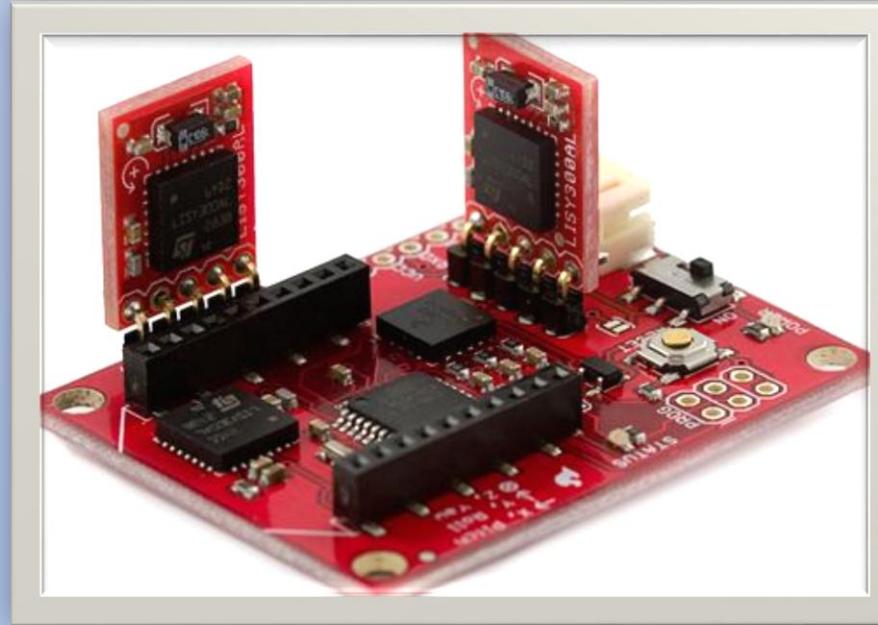


# **“CARACTERIZACION DE UNA UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL MEDIANTE ALLAN VARIANCE”**

## **PROYECTO FINAL DE CARRERA**



**Carlos Preckler Clemente  
- Febrero 2012 -**

**Universitat Autònoma de Barcelona.  
ETSE Bellaterra.**

# INDICE

- 1 - Introducción.
- 2 - Objetivos.
- 3 - Modelado de errores.
- 4 - Ubicación.
- 5 - Hardware.
- 6 - Software.
- 7 - Resultados.
- 8 - Conclusiones.
- 9 - Mejoras.

# 1-INTRODUCCION

## ➤ ¿ QUE ES UNA IMU ?

Dispositivo electrónico dotado de sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) mecánicos u ópticos, destinada a la detección y medida de aceleraciones lineales y velocidades angulares de giro.

# 1-INTRODUCCION

## ➤ USOS

- Smartphones/GSM.
- Tablet PCs.
- Cámaras foto/video.
- Discos duros portátiles.
- Navegadores GPS/INS.



# **1-INTRODUCCION**

## **➤ ¿ QUE PROBLEMAS PRESENTAN ?**

- Errores en un corto periodo de tiempo de funcionamiento.
- Requieren modelos para compensar errores.

## 2-OBJETIVOS

### ➤ HARDWARE

- Plataforma portable de integración en múltiples sistemas.
- Comunicaciones inalámbricas para la IMU.
- Integrar alimentación a baterías para la IMU.

### ➤ SOFTWARE

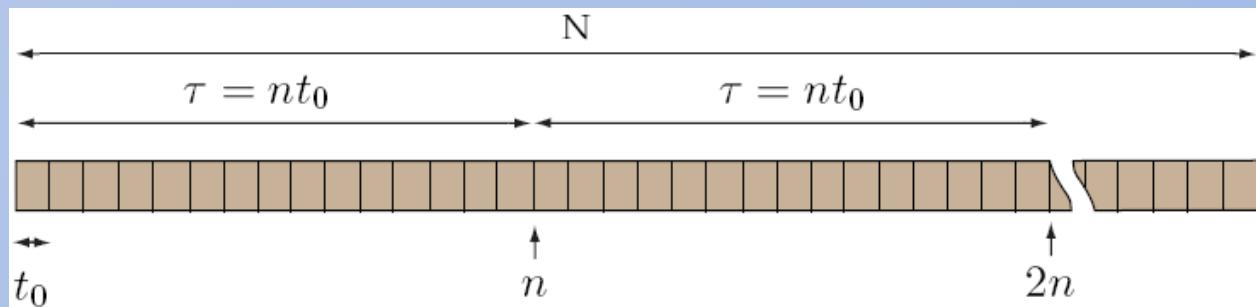
- Caracterización de los errores aleatorios de la IMU.
- Análisis Varianza de Allan de los sensores.
- Identificación y determinación errores de los sensores.
- Obtención modelos de error (mejorar rendimiento IMU).

# 3-MODELADO ERRORES

➤ Método más utilizado: Varianza de Allan.

- Algoritmo iterativo.
- Sea **N** un grupo de muestras consecutivas de longitud **L**, con frecuencia de muestreo **Fs** y tiempo de muestra  $\tau_0$ .

1. *Se forman grupos de “n” datos consecutivos (CLUSTERES) de duración  $n\tau_0$  con  $1 \leq n < N/2$ .*

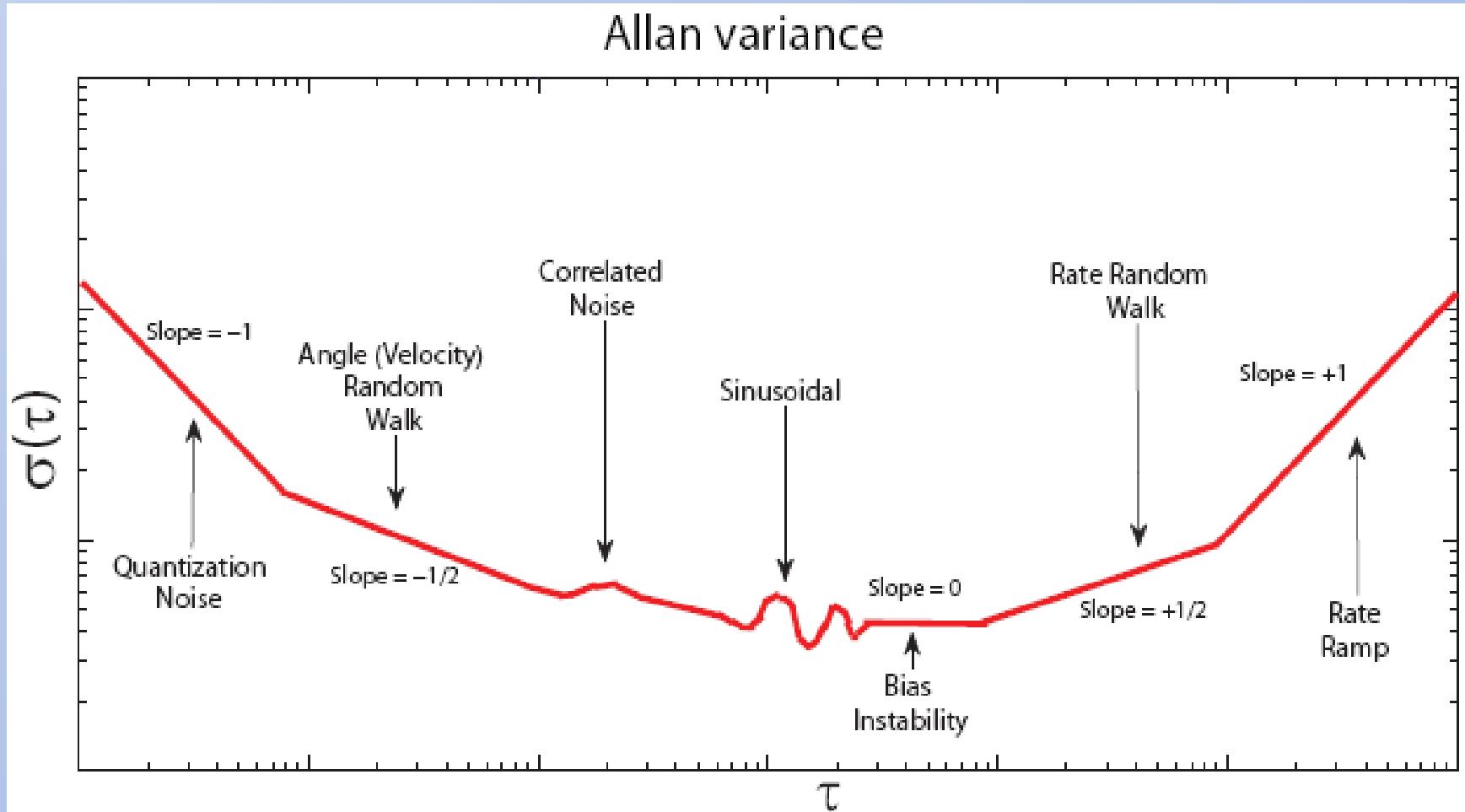


# 3-MODELADO ERRORES

2. *Obtenemos la media de cada clúster.*  $\bar{\Omega}_k(\tau)$
3. *Calculamos el sumatorio del cuadrado de la diferencia de dos clústeres consecutivos, para todas las medias obtenidas.* 
$$\sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{\Omega}_{k+\tau}(\tau) - \bar{\Omega}_k(\tau)]^2$$
4. *Normalizamos al tamaño de clúster, obteniendo un valor de varianza para el tamaño de clúster analizado.* 
$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{\Omega}_{k+\tau}(\tau) - \bar{\Omega}_k(\tau)]^2$$
5. *Reiniciamos el algoritmo incrementando el tamaño del clúster ( $n+1$ ).*

# 3-MODELADO ERRORES

➤ Resultado genérico:



# 4-UBICACION

➤ Sistemas ayuda navegación actuales:

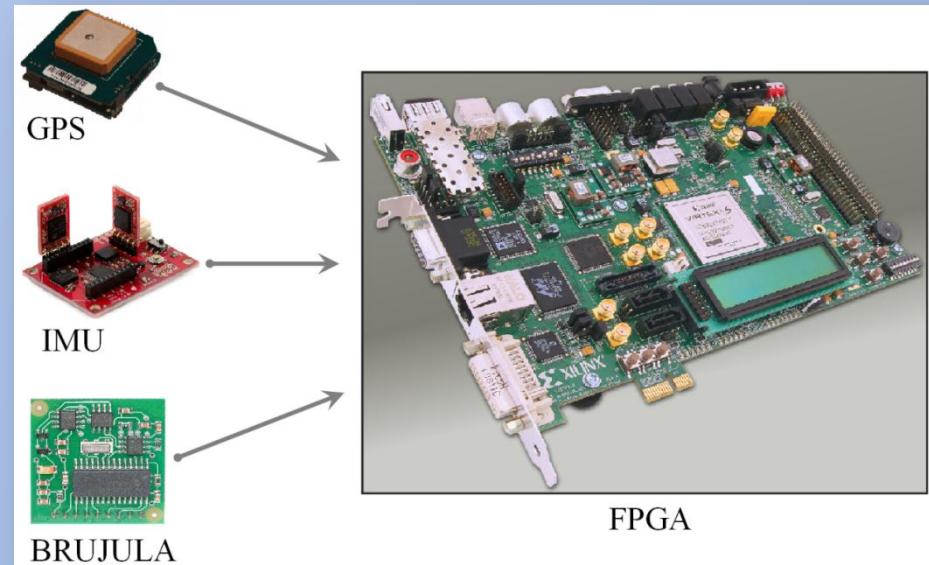
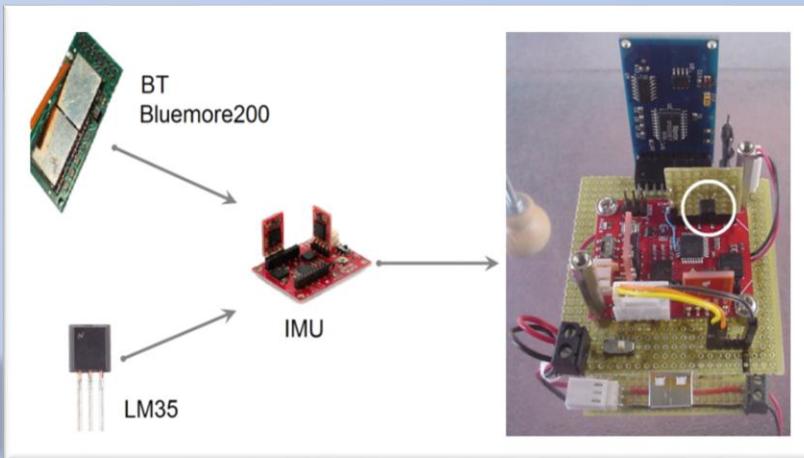
- Receptor GPS
- IMU
- Brújula digital

➤ Ejemplos sistemas dotados de estos instrumentos:



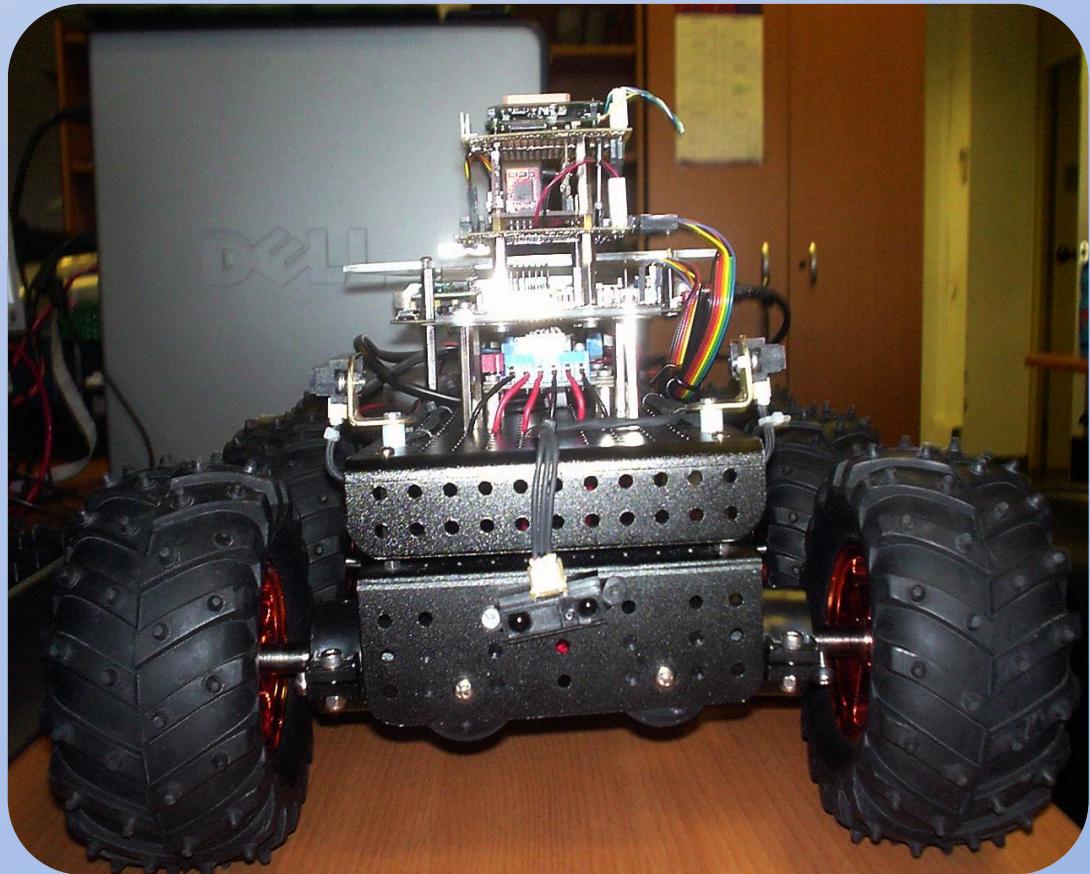
# 4-UBICACION

- Sistema de navegación inercial GPS/INS de bajo coste, en desarrollo por el departamento de microelectrónica y sistemas electrónicos.

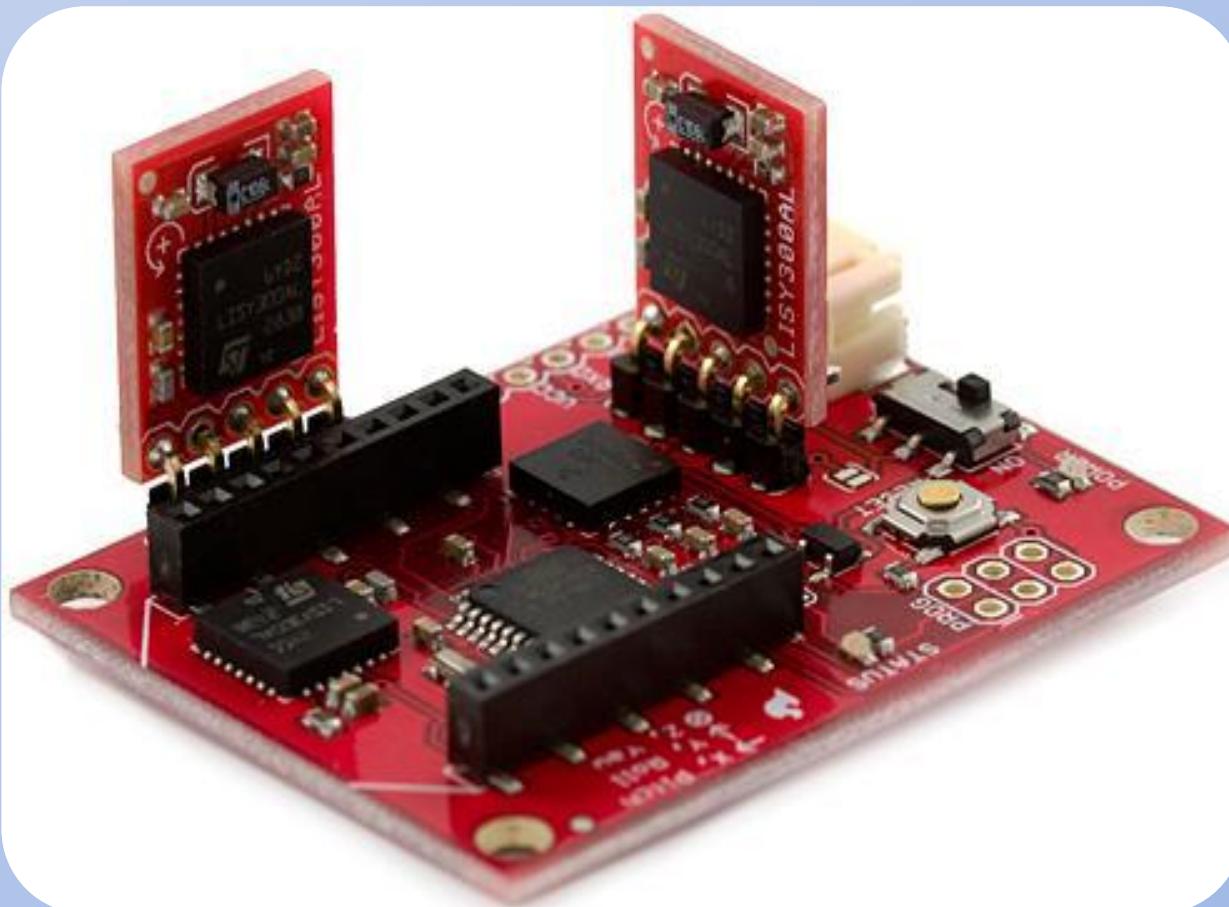


# 4-UBICACION

Sistema en desarrollo: *GPS/INS* → *FPGA*



# 5-HARDWARE



# 5-HARDWARE

## Características:

- Integra los sensores:
  - *FREESCALE MMA7260Q (acelerómetro triaxial) (20€ aprox).*
  - *3 ST MicroElectronics LISY300AL (giroscopios axiales) (24€ aprox).*
- Alimentación:  $[3.4-10]V_{DC}$
- Consumo:  $24mA$  ( $75mA$  con *XBee*)
- Resolución giroscopios:  $0.977^\circ/s$
- Resolución acelerómetros:
  - $0.00403g$  @  $1.5g$  (FS)
  - $0.00537g$  @  $2g$  (FS)
  - $0.0107g$  @  $4g$  (FS)
  - $0.0161g$  @  $6g$  (FS)
- UART
  - (*XBee*: protocolo comunicaciones RF IEEE 802.15.4)
  - (*UART*: Receptor-Transmisor asíncrono universal)

# 5-HARDWARE

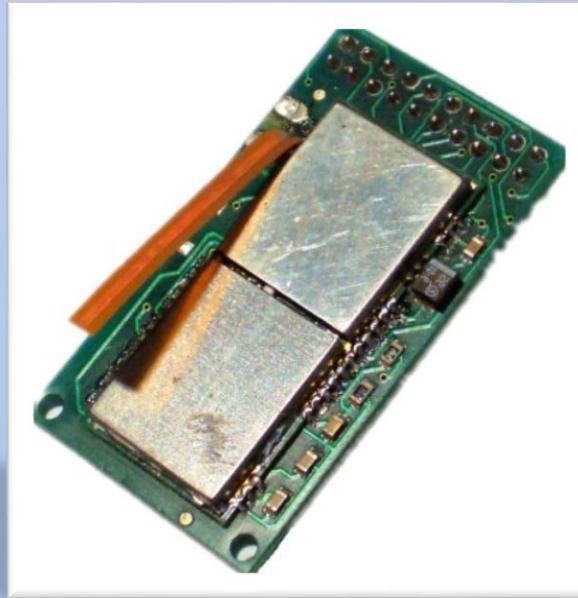
## Pros:

- Ultra bajo coste (100€ aprox).
- Autorregulación a 3,3V.
- Posible uso con baterías (bajo consumo).
- Configuración de sensibilidades y rangos de medida.
- Conectividad Xbee (opcional).
- Versatilidad ATMega168, código libre y personalizable.

## Contras:

- Sensores de bajo coste, ruidosos.
- Tamaño relativamente grande.(47x37[mm])
- No dispone de carcasa protectora.

# 5-HARDWARE



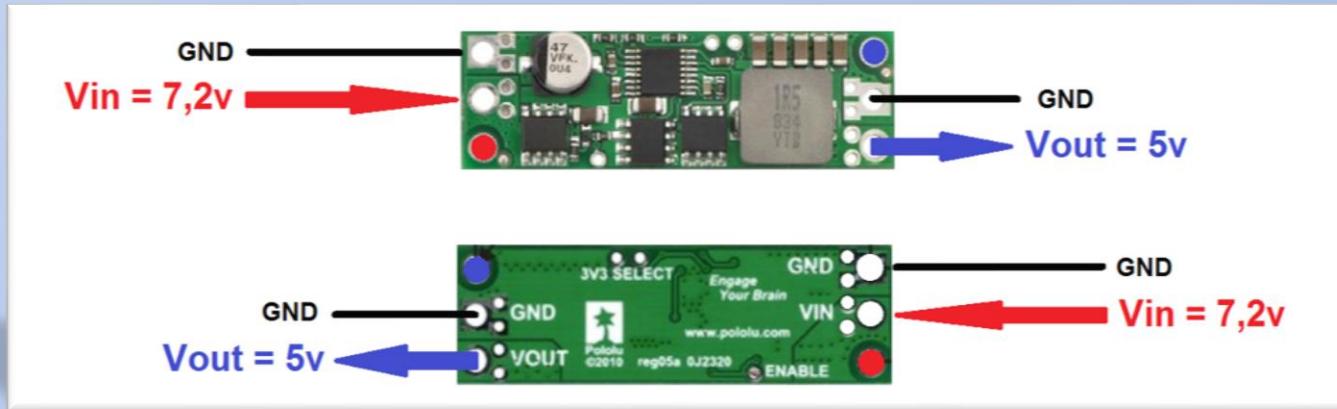
- Bluetooth v1.2 compatible, hasta 100m alcance.
- Comunicación serie RS232 (1200baud – 230400baud).
- UART serie 3,3V y 5V.
- Hasta 3 señales I/O.
- Firmware personalizable.
- Sin drivers.

# 5-HARDWARE



- Acumulador de Níquel-Cadmio.
- Tensión salida: 7,2v.
- Capacidad: 1500mAh.

# 5-HARDWARE



- Regulador DC-DC.
- $V_{in} = [4.5v-24v]$
- $V_{out} = [3.3v, 5v]$  (seleccionable por JUMPER)
- $I_{max} = 7 \text{ A}_{DC}$

# 6-SOFTWARE

Formato de datos ADC IMU:

ACELEROMETROS			GIROSCOPIOS			TEMPERATURA
Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z	AMBIENTE
496	492	790	519	498	498	63
497	496	791	519	499	498	63
503	490	789	521	497	497	63
498	496	790	519	497	497	68
497	497	790	521	497	497	51
500	494	790	520	498	498	66
499	492	795	519	497	498	66
499	490	793	520	498	498	67
499	492	791	520	498	497	67
500	493	791	519	496	497	52
501	498	790	520	497	498	67
498	492	793	520	497	498	67
501	495	789	519	497	498	67
498	497	793	520	498	497	67
497	494	790	520	498	498	67
503	494	792	519	497	497	67
496	494	791	520	498	498	50
498	495	792	520	497	497	68
498	491	793	520	497	498	65

# 6-SOFTWARE

- Convertimos a voltaje y centramos en  $V_{ref}/2$ :

$$V_{OUT}^{ADC} = ADC\left(\frac{V_{ref}}{1024}\right) - \left(\frac{V_{ref}}{2}\right)$$

- Eliminamos el offset de las lecturas:

$$V_{ZERO}^{ADC} = V_{OUT}^{ADC} - \text{media}\left(V_{OUT}^{ADC}\right)$$

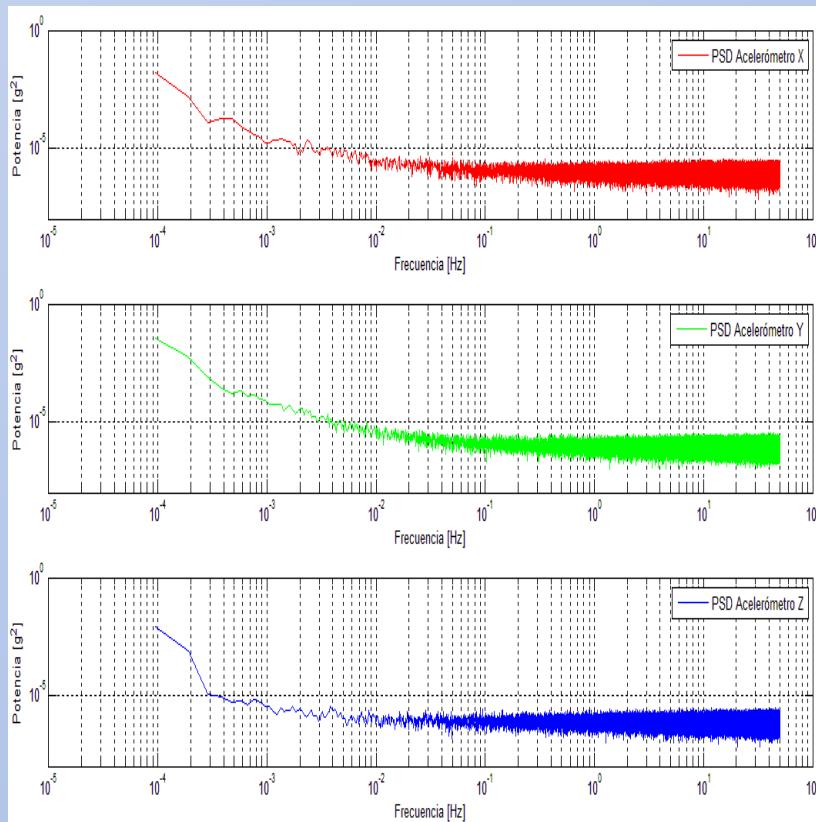
- Convertimos a magnitud física:

$$\begin{bmatrix} \text{Magnitud} \\ \text{Física} \end{bmatrix} = \frac{V_{out}^{\text{sensor}} [\text{v}]}{\text{Sensibilidad}_{\text{sensor}}}$$

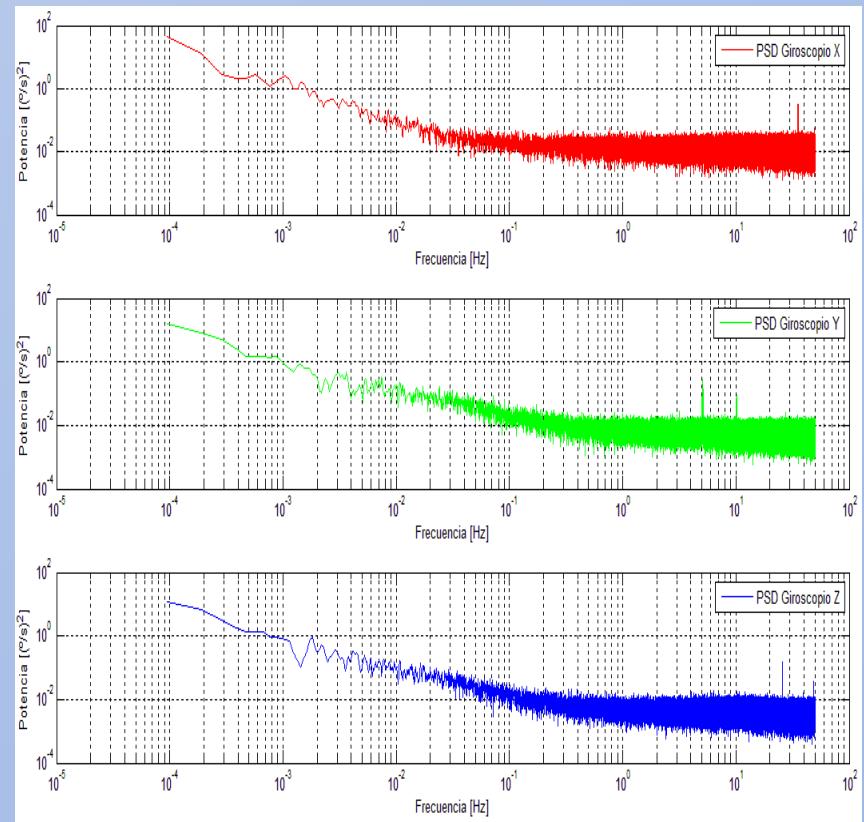
- PSD de las magnitudes físicas, ruido. (función PWELCH)

# 6-SOFTWARE

- Acelerómetros: @100Hz

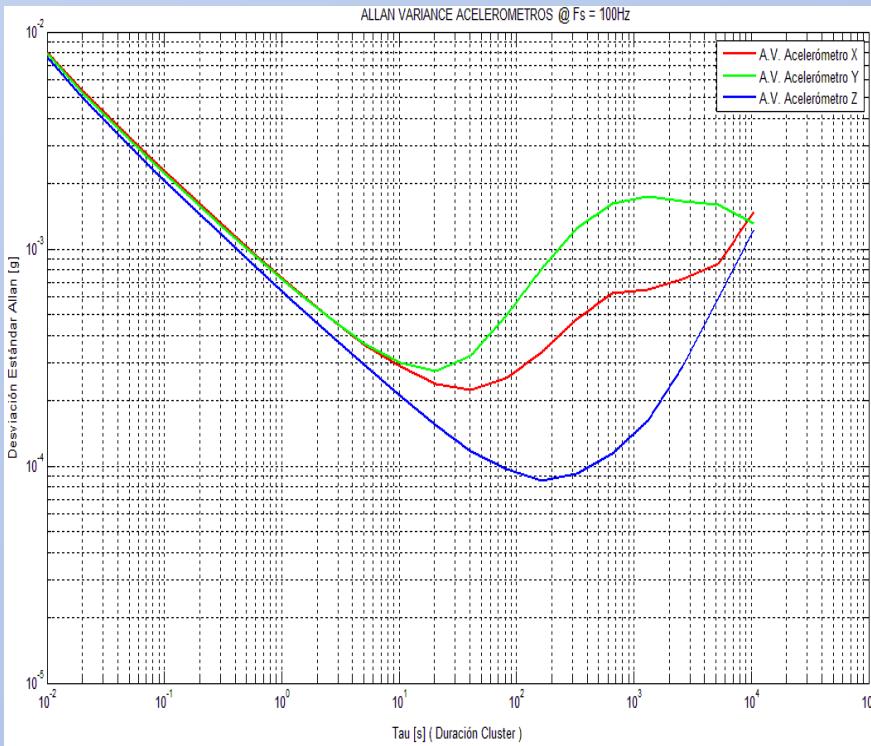


- Giroscopios: @100Hz

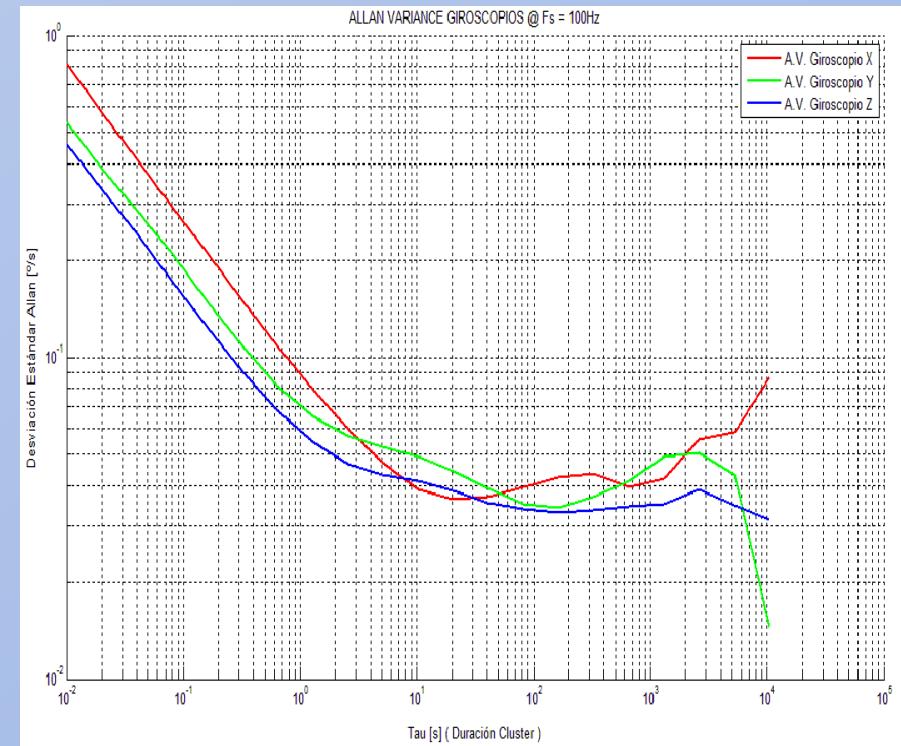


# 6-SOFTWARE

## ■ Acelerómetros: @ 100Hz



## ■ Giroskopios: @ 100Hz



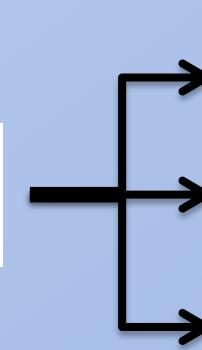
## 6-SOFTWARE

- Efecto dominante de Angular/Velocity Random Walk.
- Ambos tipos de sensores sufren error de Bias.
- Los giroscopios no presentan Rate Random Walk.

# 6-SOFTWARE

➤ Bias Instability: Ref.[2]

$$N_{BIAS}(k+1) = a_d N_{BIAS}(k) + b_d \eta(k)$$


$$a_d = e^{\left(\frac{-1}{T}\right)\Delta T}$$
$$b_d = \int_0^{\Delta T} e^{\left(\frac{-1}{T}\right)\tau} d\tau$$
$$\Delta T = \frac{1}{f_s}$$

$\eta(k)$  Ruido blanco discreto con desviación estándar:

$$\sigma_\eta = \sqrt{1 - \frac{a_d^2 B}{b_d}}$$

# 6-SOFTWARE

➤ Acceleration/Rate Random Walk: Ref.[2]

$$rrw(z) = K \cdot dfilt(z) \cdot w(z)$$

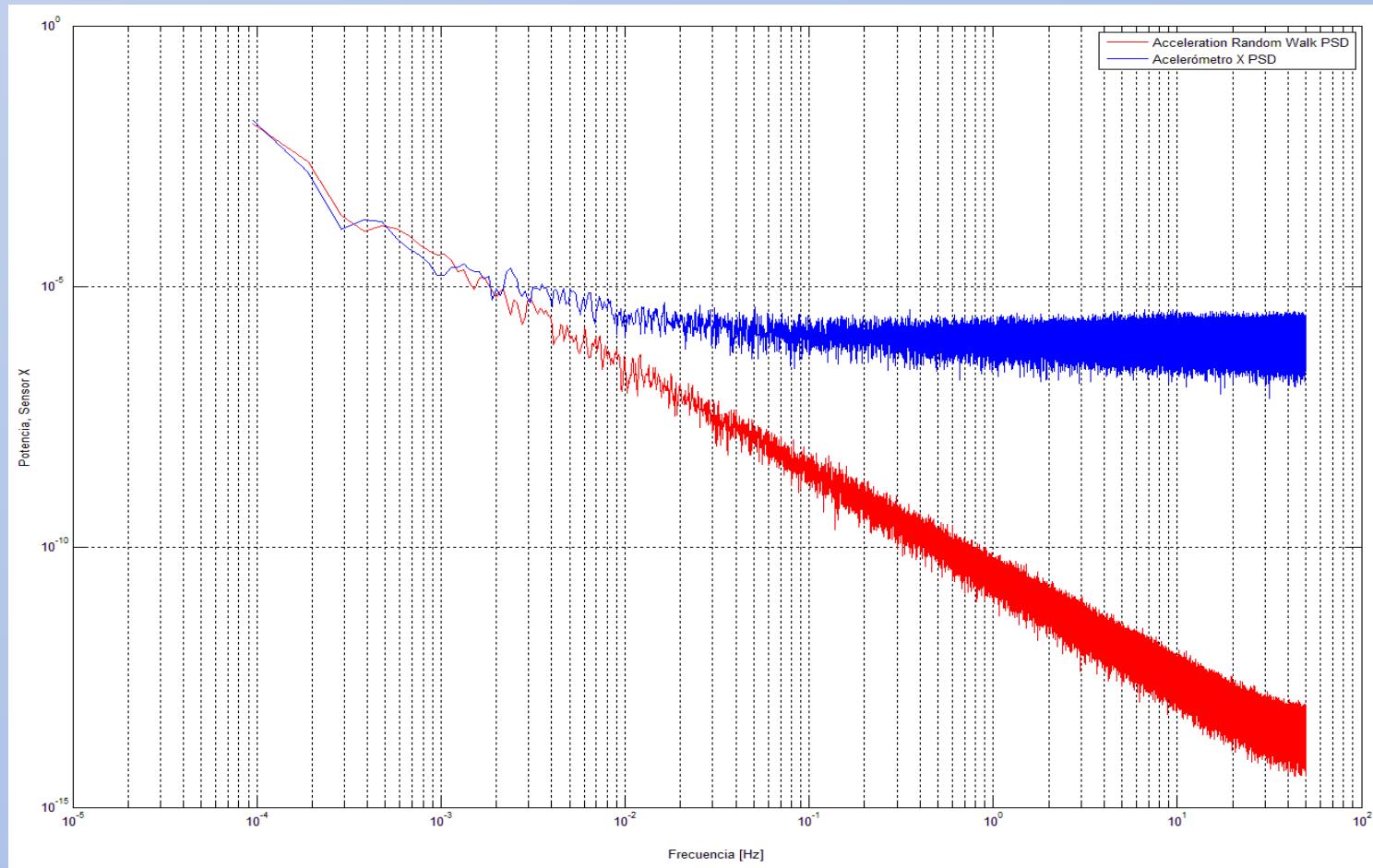
$$dfilt(z) = \frac{\Delta T_s}{(z - 1)}$$

$rrw(z)$  Ruido coloreado, con  $w(z)$  ruido blanco de varianza desconocida.

Aproximar baja frecuencia de la PSD del sensor y ARRW, con desviación estándar de  $w(z)$ .

# 6-SOFTWARE

## ➤ Acceleration/Rate Random Walk: Ref.[2]



# 6-SOFTWARE

## ➤ Angular/Velocity Random Walk: Ref.[2]

- Ruido blanco de desviación estándar:

$$\sigma_{ARW} = \sqrt{\sigma_{ruido\_sensor}^2 - B^2 - \sigma_{RRW}^2}$$

## ➤ Modelo de Ruido: Ref.[2]

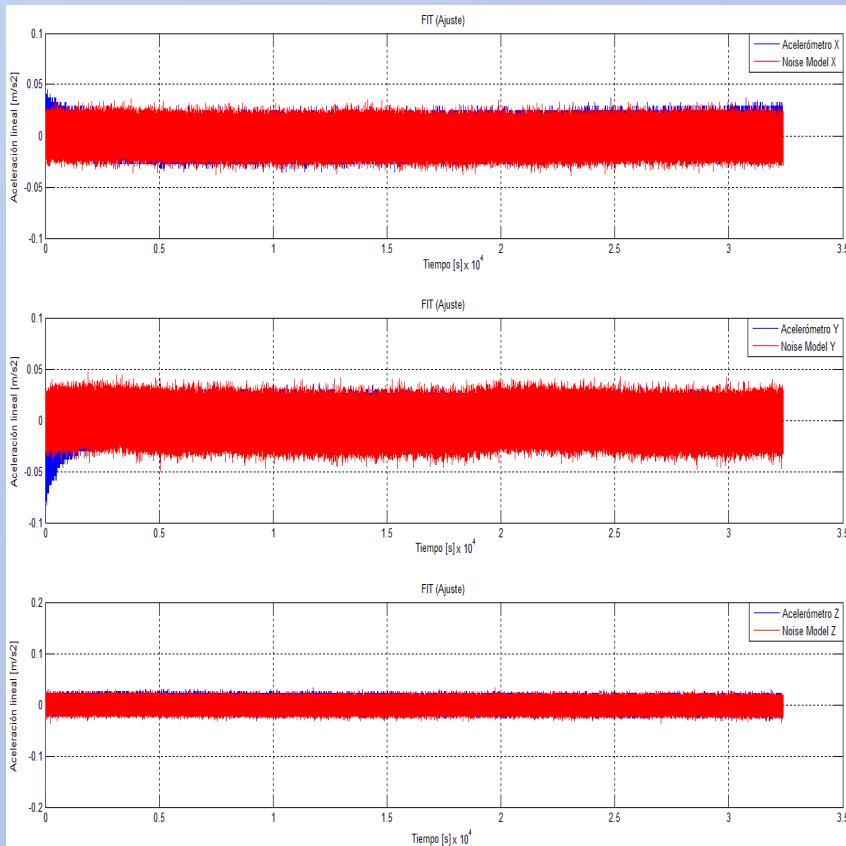
$$N_{sensor} = N_{BIAS} + N_{RRW} + N_{AVRW}$$

## ➤ FIT del modelo con medidas: Ref.[1]

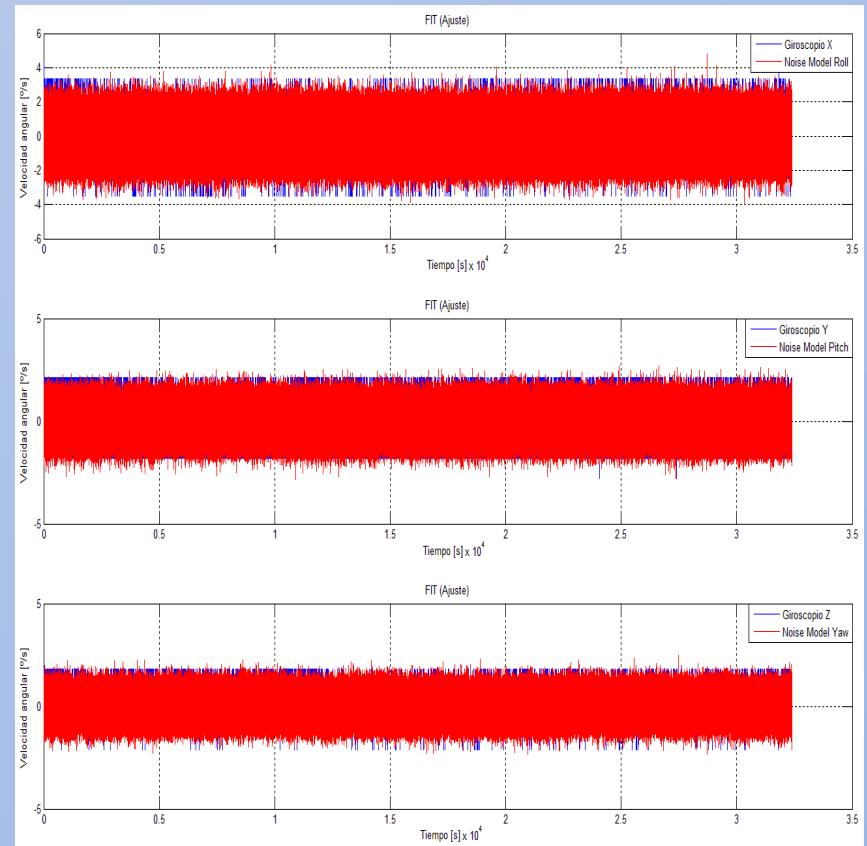
$$FIT = \left( 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^L (x_{sensor}(k) - x_{modelo}(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^L (x_{sensor}(k))^2}} \right) 100\%$$

# 6-SOFTWARE

## ■ FIT Acelerómetros: @100Hz



## ■ FIT Giroscopios: @100Hz



# 7-RESULTADOS

$F_s = 100\text{Hz}$ :

SENSOR	N	B	K	$\sigma_{\text{SENSOR}}$	$\sigma_{\text{BIAS}}$	$\sigma_{\text{AVRW}}$	$\sigma_{\text{ARRW}}$	FIT
Aceleróm. X	$(7,2 \cdot 10^{-4} \pm 2,83 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(3,37 \cdot 10^{-4} \pm 8,48 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(4,2 \cdot 10^{-5} \pm 2,86 \cdot 10^{-9}) [\text{m/s}]$	$7,57 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$7,45 \cdot 10^{-4}$	$7,56 \cdot 10^{-3}$	5,00	98,58%
Aceleróm. Y	$(7,2 \cdot 10^{-4} \pm 2,83 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(4,11 \cdot 10^{-4} \pm 7,31 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(8,8 \cdot 10^{-5} \pm 5,99 \cdot 10^{-9}) [\text{m/s}]$	$9,43 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$9,42 \cdot 10^{-3}$	5,00	98,54%
Aceleróm. Z	$(6,2 \cdot 10^{-4} \pm 2,44 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(1,30 \cdot 10^{-4} \pm 6,53 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(7,5 \cdot 10^{-6} \pm 5,10 \cdot 10^{-10}) [\text{m/s}]$	$6,57 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$6,57 \cdot 10^{-3}$	9,00	98,58%
Giroscopio X	$(8,2 \cdot 10^{-2} \pm 3,22 \cdot 10^{-6}) [{}^{\circ}]$	$(5,47 \cdot 10^{-2} \pm 9,74 \cdot 10^{-6}) [{}^{\circ}]$	-----	$8,27 \cdot 10^{-1} [{}^{\circ}/\text{s}]$	$1,71 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	----	98,59%
Giroscopio Y	$(6,5 \cdot 10^{-2} \pm 2,55 \cdot 10^{-6}) [{}^{\circ}]$	$(5,12 \cdot 10^{-2} \pm 2,58 \cdot 10^{-5}) [{}^{\circ}]$	-----	$5,64 \cdot 10^{-1} [{}^{\circ}/\text{s}]$	$5,65 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-1}$	----	98,59%
Giroscopio Z	$(5,4 \cdot 10^{-2} \pm 2,12 \cdot 10^{-6}) [{}^{\circ}]$	$(4,96 \cdot 10^{-2} \pm 2,50 \cdot 10^{-5}) [{}^{\circ}]$	-----	$4,78 \cdot 10^{-1} [{}^{\circ}/\text{s}]$	$5,48 \cdot 10^{-2}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	----	98,59%

# 7-RESULTADOS

$F_s = 200\text{Hz}$ :

SENSOR	N	B	K	$\sigma_{\text{SENSOR}}$	$\sigma_{\text{BIAS}}$	$\sigma_{\text{AVRW}}$	$\sigma_{\text{ARRW}}$	FIT
Aceleróm. X	$(5,0 \cdot 10^{-4} \pm 2,78 \cdot 10^{-8}) \text{ [m/s]}$	$(3,03 \cdot 10^{-4} \pm 1,08 \cdot 10^{-7}) \text{ [m/s]}$	$(3,9 \cdot 10^{-5} \pm 3,75 \cdot 10^{-9}) \text{ [m/s]}$	$7,35 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s}^2]$	$9,42 \cdot 10^{-4}$	$7,34 \cdot 10^{-3}$	4,00	98,59%
Aceleróm. Y	$(5,0 \cdot 10^{-4} \pm 2,78 \cdot 10^{-8}) \text{ [m/s]}$	$(3,57 \cdot 10^{-4} \pm 8,98 \cdot 10^{-8}) \text{ [m/s]}$	$(7,0 \cdot 10^{-5} \pm 6,74 \cdot 10^{-9}) \text{ [m/s]}$	$9,40 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s}^2]$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$9,39 \cdot 10^{-3}$	7,45	98,47%
Aceleróm. Z	$(4,3 \cdot 10^{-4} \pm 2,39 \cdot 10^{-8}) \text{ [m/s]}$	$(1,24 \cdot 10^{-4} \pm 8,85 \cdot 10^{-8}) \text{ [m/s]}$	$(5,5 \cdot 10^{-6} \pm 5,29 \cdot 10^{-10}) \text{ [m/s]}$	$6,44 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s}^2]$	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$6,44 \cdot 10^{-3}$	13,50	98,58%
Giroscopio X	$(6,0 \cdot 10^{-2} \pm 3,33 \cdot 10^{-6}) \text{ [º]}$	$(5,19 \cdot 10^{-2} \pm 9,24 \cdot 10^{-6}) \text{ [º]}$	-----	$8,24 \cdot 10^{-1} \text{ [º/s]}$	$3,25 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	----	98,59%
Giroscopio Y	$(4,5 \cdot 10^{-2} \pm 2,50 \cdot 10^{-6}) \text{ [º]}$	$(5,19 \cdot 10^{-2} \pm 2,62 \cdot 10^{-5}) \text{ [º]}$	-----	$5,69 \cdot 10^{-1} \text{ [º/s]}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	----	98,59%
Giroscopio Z	$(4,2 \cdot 10^{-2} \pm 2,33 \cdot 10^{-6}) \text{ [º]}$	$(3,50 \cdot 10^{-2} \pm 7,33 \cdot 10^{-5}) \text{ [º]}$	-----	$4,63 \cdot 10^{-1} \text{ [º/s]}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$4,61 \cdot 10^{-1}$	----	98,58%

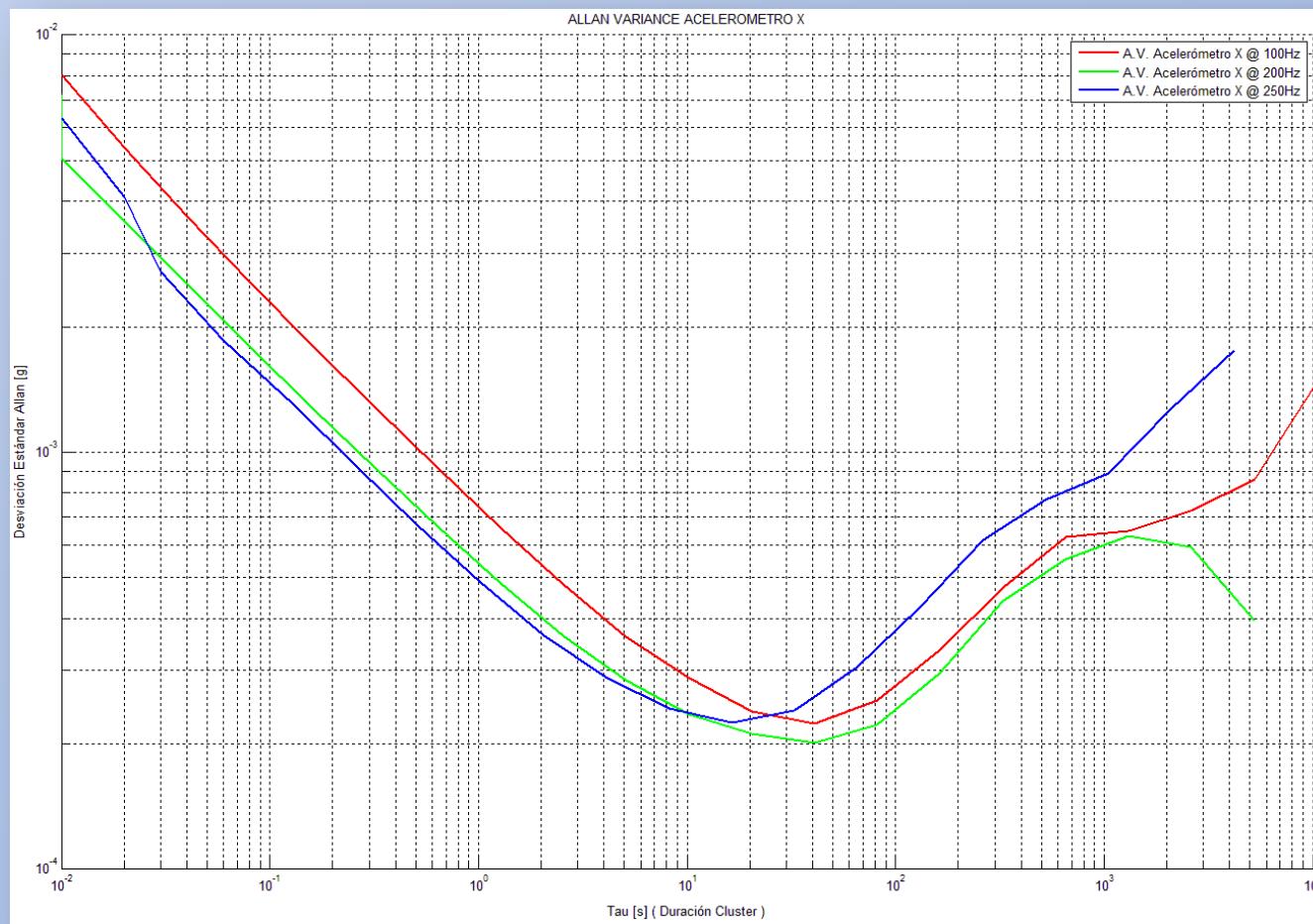
# 7-RESULTADOS

$F_s = 250\text{Hz}$ :

SENSOR	N	B	K	$\sigma_{\text{SENSOR}}$	$\sigma_{\text{BIAS}}$	$\sigma_{\text{AVRW}}$	$\sigma_{\text{ARRW}}$	FIT
Aceleróm. X	$(4,3 \cdot 10^4 \pm 2,67 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(3,38 \cdot 10^4 \pm 8,15 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(6,2 \cdot 10^5 \pm 6,67 \cdot 10^{-9}) [\text{m/s}]$	$7,59 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$7,58 \cdot 10^{-3}$	10,00	98,53%
Aceleróm. Y	$(4,3 \cdot 10^4 \pm 2,67 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(4,43 \cdot 10^4 \pm 7,88 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(1,4 \cdot 10^4 \pm 1,51 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$9,13 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	10,00	98,30%
Aceleróm. Z	$(3,9 \cdot 10^4 \pm 2,42 \cdot 10^{-8}) [\text{m/s}]$	$(1,36 \cdot 10^4 \pm 6,86 \cdot 10^{-8}) [^{\circ}]$	$(9,0 \cdot 10^{-6} \pm 9,68 \cdot 10^{-10}) [\text{m/s}]$	$6,47 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2]$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-3}$	10,00	98,58%
Giroscopio X	$(3,3 \cdot 10^2 \pm 2,05 \cdot 10^{-6}) [^{\circ}]$	$(5,27 \cdot 10^2 \pm 1,32 \cdot 10^{-5}) [^{\circ}]$	-----	$8,22 \cdot 10^{-1} [^{\circ}/\text{s}]$	$2,91 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$	-----	98,59%
Giroscopio Y	$(2,4 \cdot 10^2 \pm 1,49 \cdot 10^{-6}) [^{\circ}]$	$(4,47 \cdot 10^2 \pm 9,37 \cdot 10^{-5}) [^{\circ}]$	-----	$5,69 \cdot 10^{-1} [^{\circ}/\text{s}]$	$3,08 \cdot 10^{-2}$	$5,67 \cdot 10^{-1}$	-----	98,59%
Giroscopio Z	$(1,8 \cdot 10^2 \pm 1,12 \cdot 10^{-6}) [^{\circ}]$	$(4,30 \cdot 10^2 \pm 3,07 \cdot 10^{-5}) [^{\circ}]$	-----	$4,68 \cdot 10^{-1} [^{\circ}/\text{s}]$	$8,40 \cdot 10^{-2}$	$4,66 \cdot 10^{-1}$	-----	98,59%

# 7-RESULTADOS

- Allan Variance acelerómetro X (3 frecuencias muestreo):



# 8-CONCLUSIONES

- ✓ Se ha creado una plataforma de integración para la IMU.
  - ✓ Se ha añadido conectividad bluetooth a la plataforma.
  - ✓ Se ha integrado la alimentación a baterías.
- 
- ✓ Se han identificado los errores de los sensores.
  - ✓ Se han determinado las constantes y los modelos de errores.
  - ✓ Se han obtenido resultados de FIT > 98%.

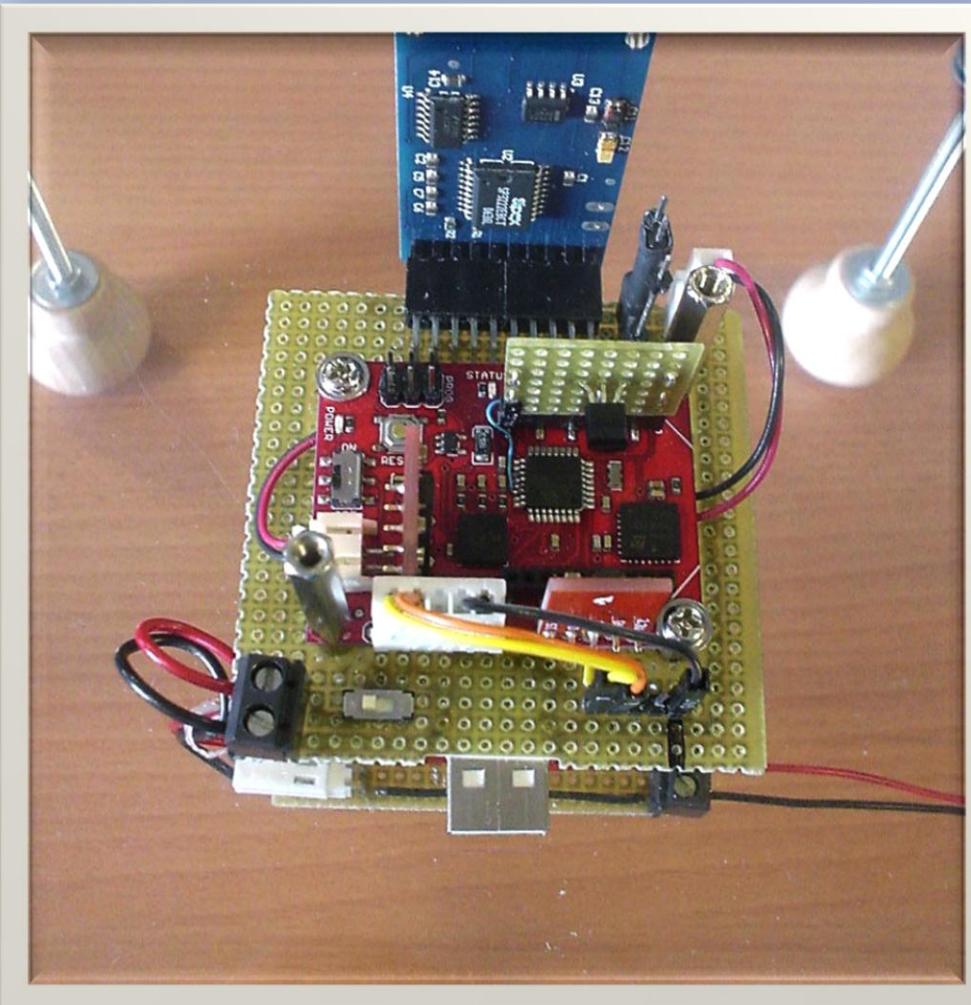
# 8-CONCLUSIONES

- Dependencia de  $\sigma$  con  $F_s$ :
  - **NO:**  $\sigma_{\text{sensor}}$  y  $\sigma_{\text{AVRW}}$
  - **SI:**  $\sigma_{\text{BIAS}}$  y  $\sigma_{\text{ARRW}}$  (*directamente proporcional*)
- Dependencia de constantes error con  $F_s$ :
  - **NO:** **B** (*Bias*) y **K** (*ARRW*)
  - **SI:** **N** (*inversamente proporcional*) (*A/VRW*)

## **9-MEJORAS**

- Incrementar variedad de  $F_s$  para modelado de errores.
- Implementar modelado térmico de modelos de error.
- Estudiar dependencia frecuencial y térmica de parámetros de error extraídos de Varianza de Allan.

**- FIN -**



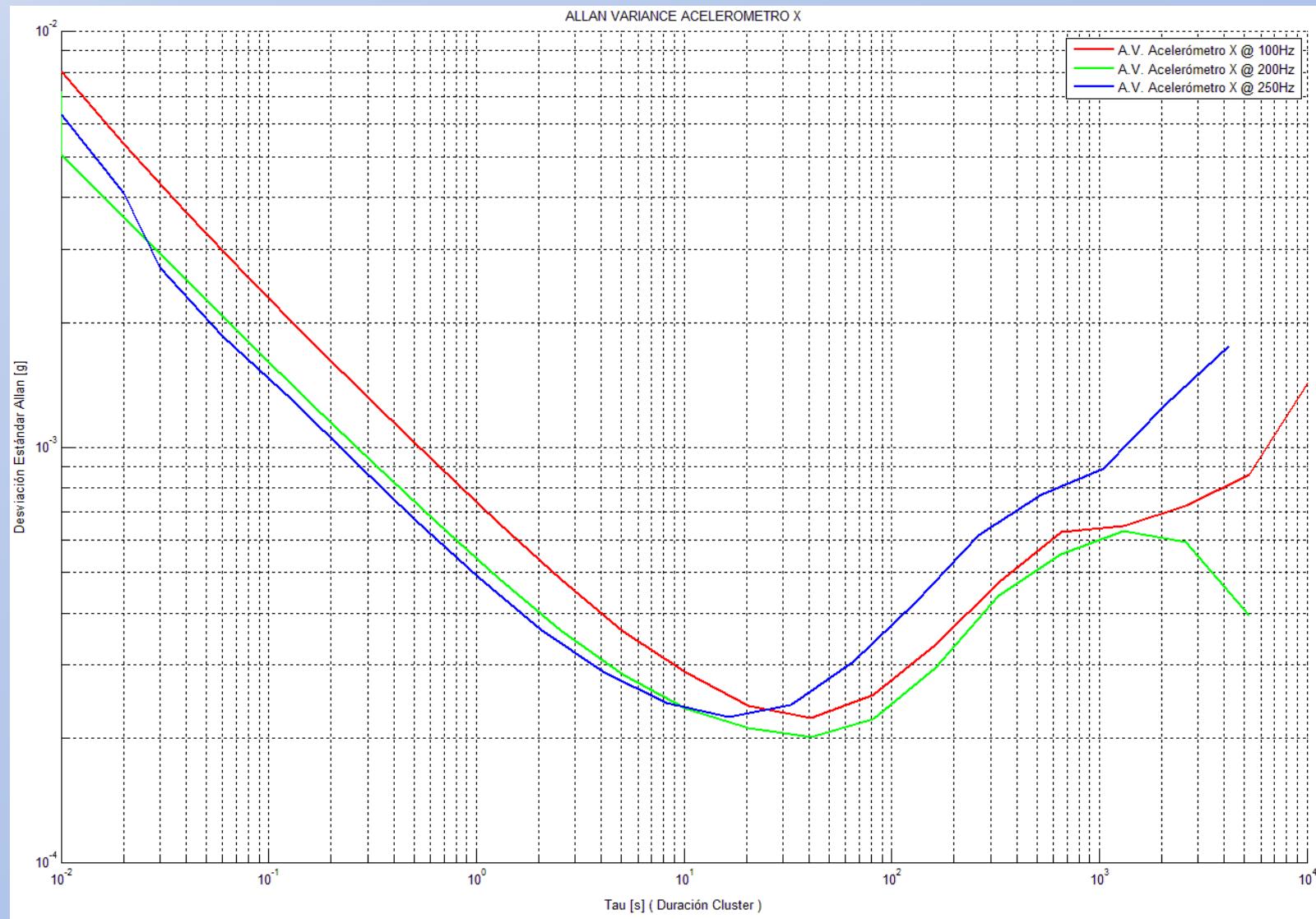
**- FIN -**

# REFERENCIAS

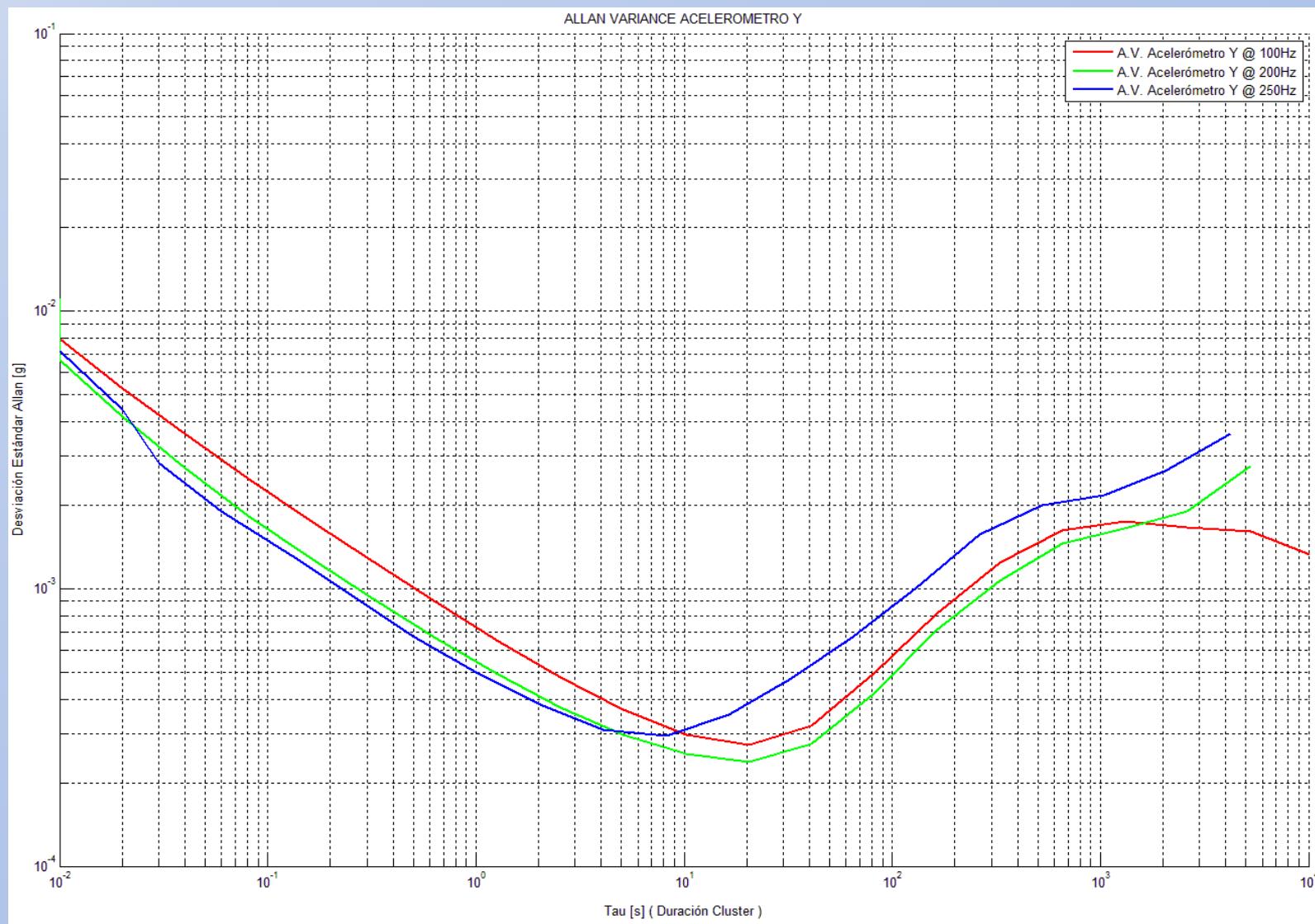
Trabajo basado en los documentos:

1. *“Analysis and Modeling of MEMS based Inertial Sensors”*,  
Claudia C. Meruane Naranjo. School of Electrical Engineering, Kungliga  
Tekniska Hgskolan (Stockholm, 2008)
2. *“Stochastic Modeling of MEMS Inertial sensors”*, Petko  
Petkov, Tsionyo Slavov. Department of Automatichs, Technical University  
of Sofia (Sofia, Bulgaria).

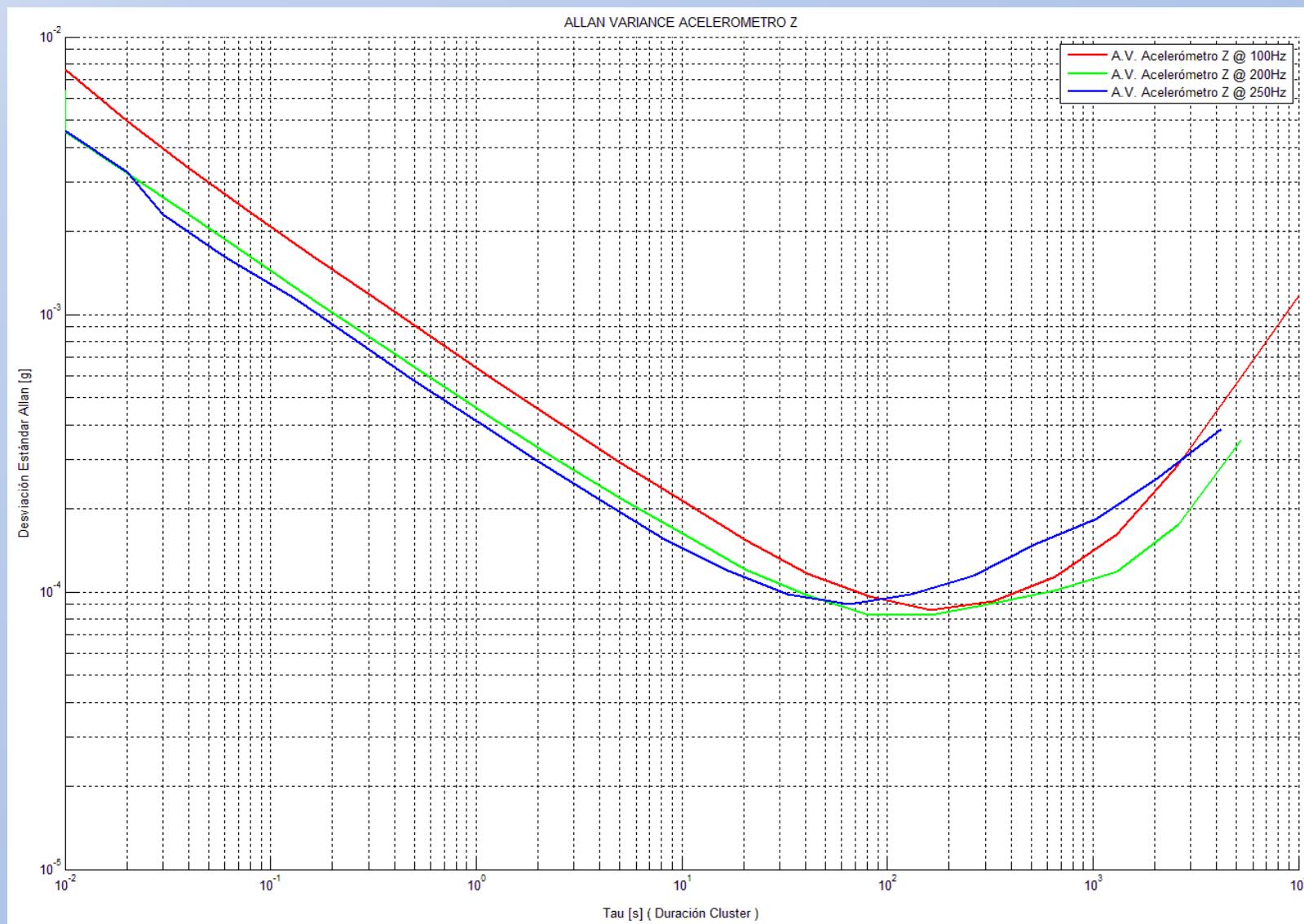
# GRAFICAS



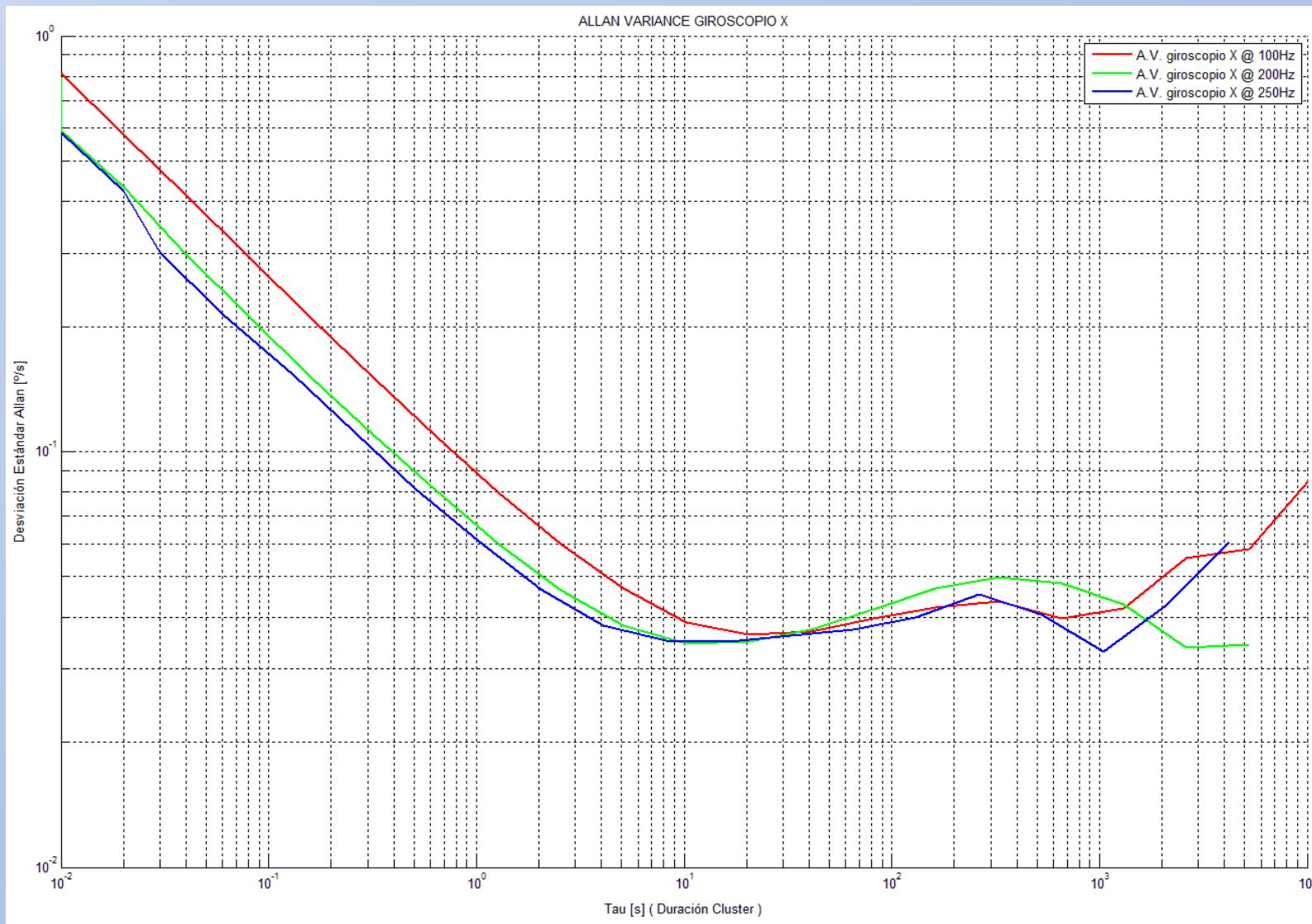
# GRAFICAS



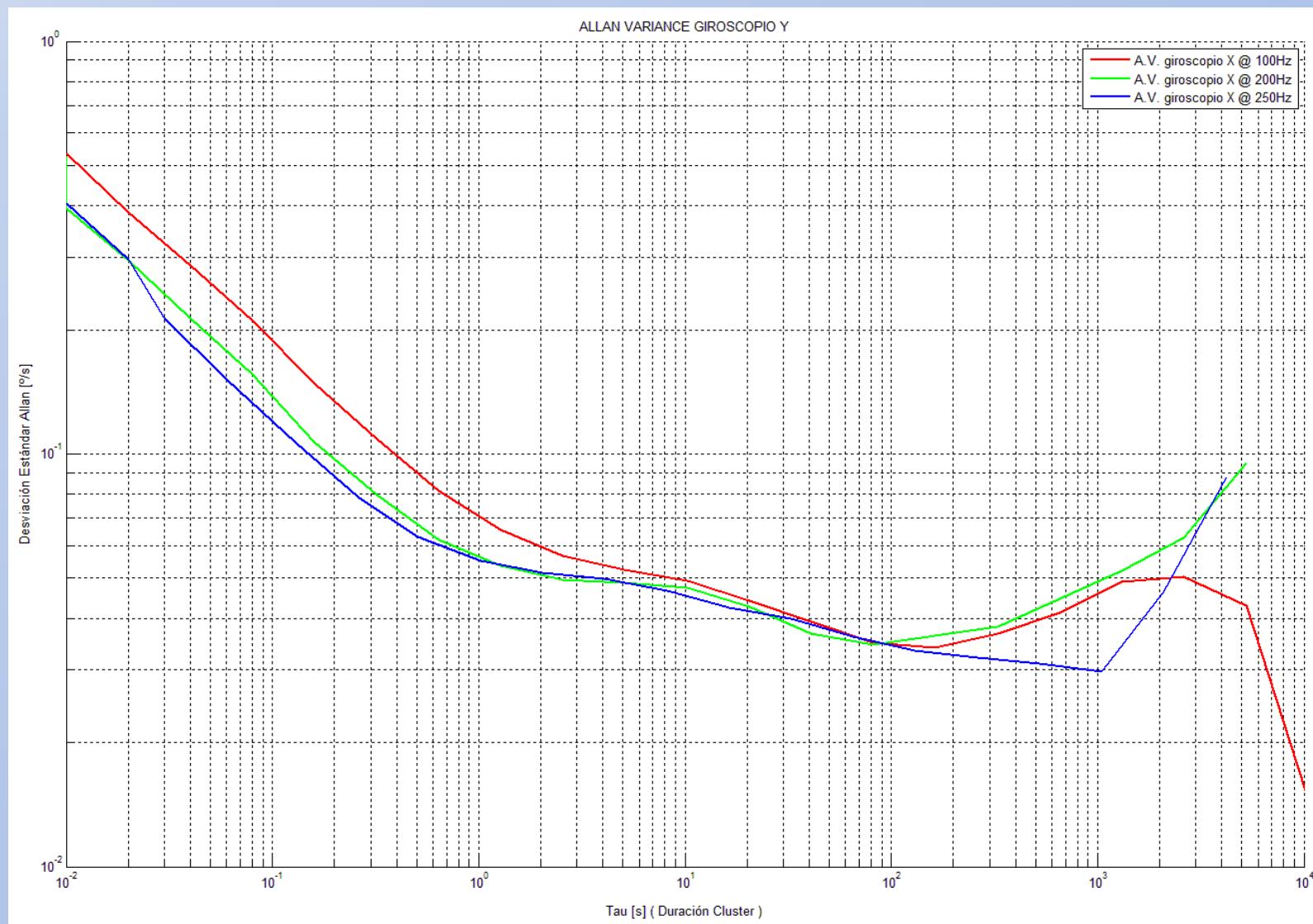
# GRAFICAS



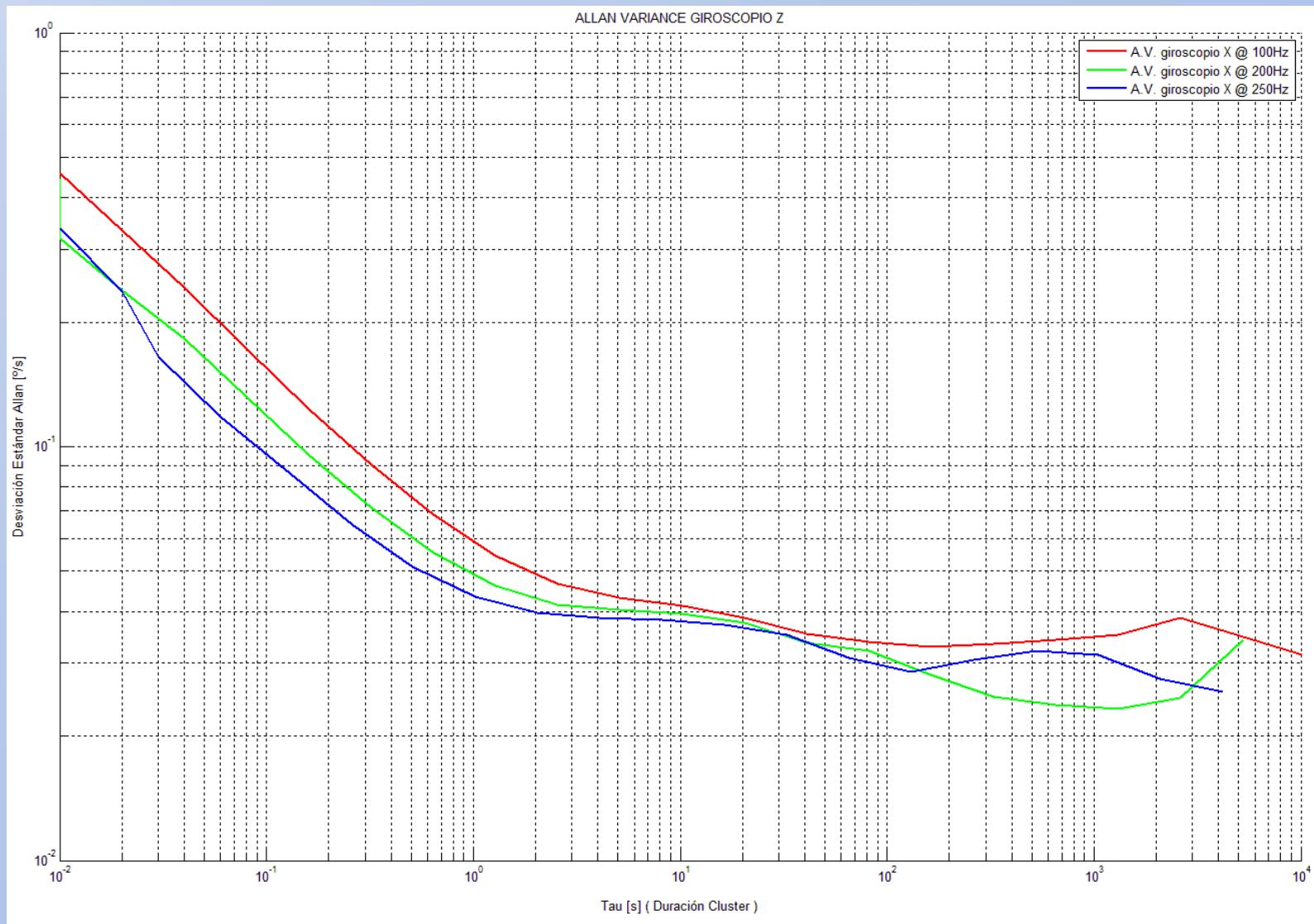
# GRAFICAS



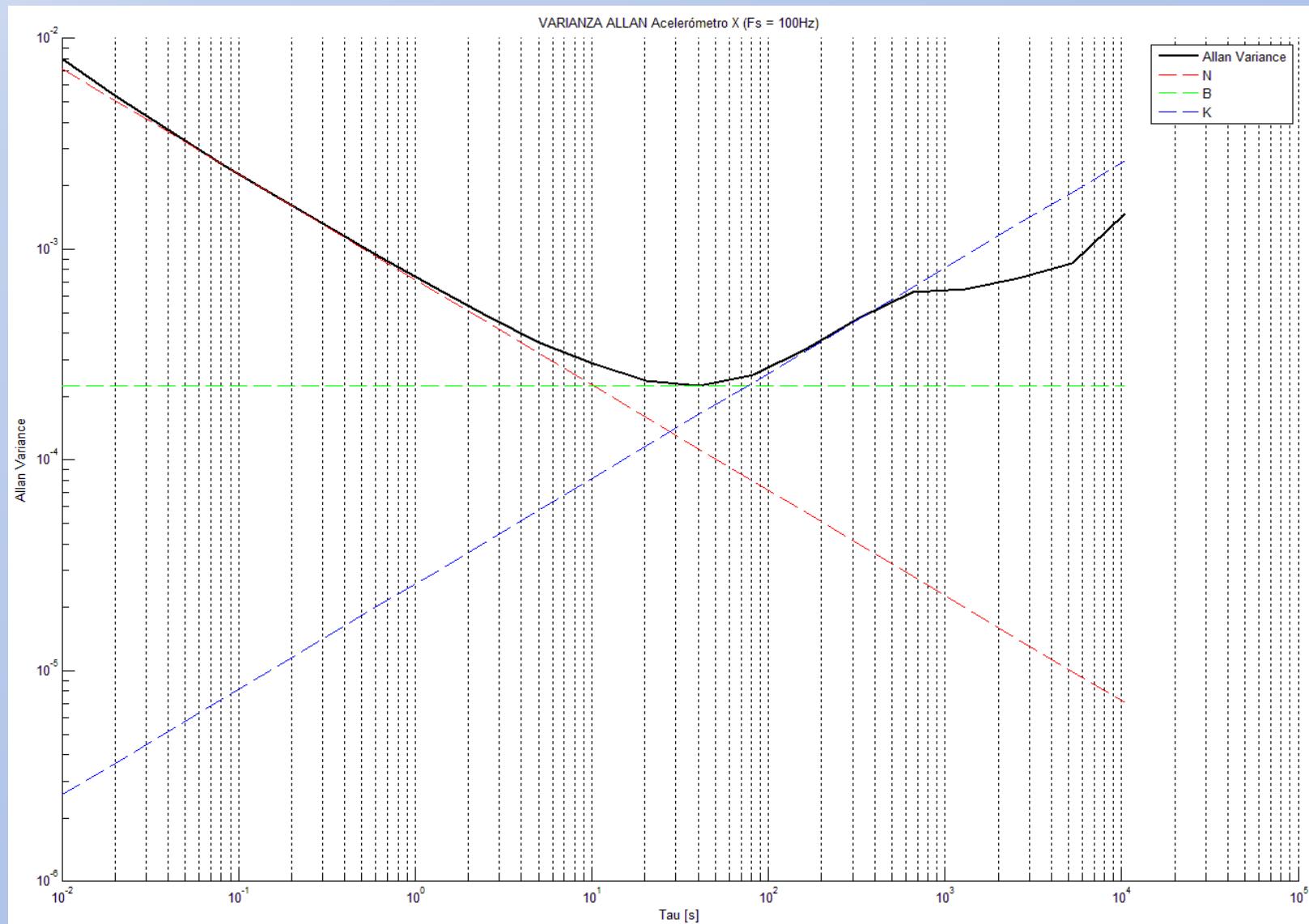
# GRAFICAS



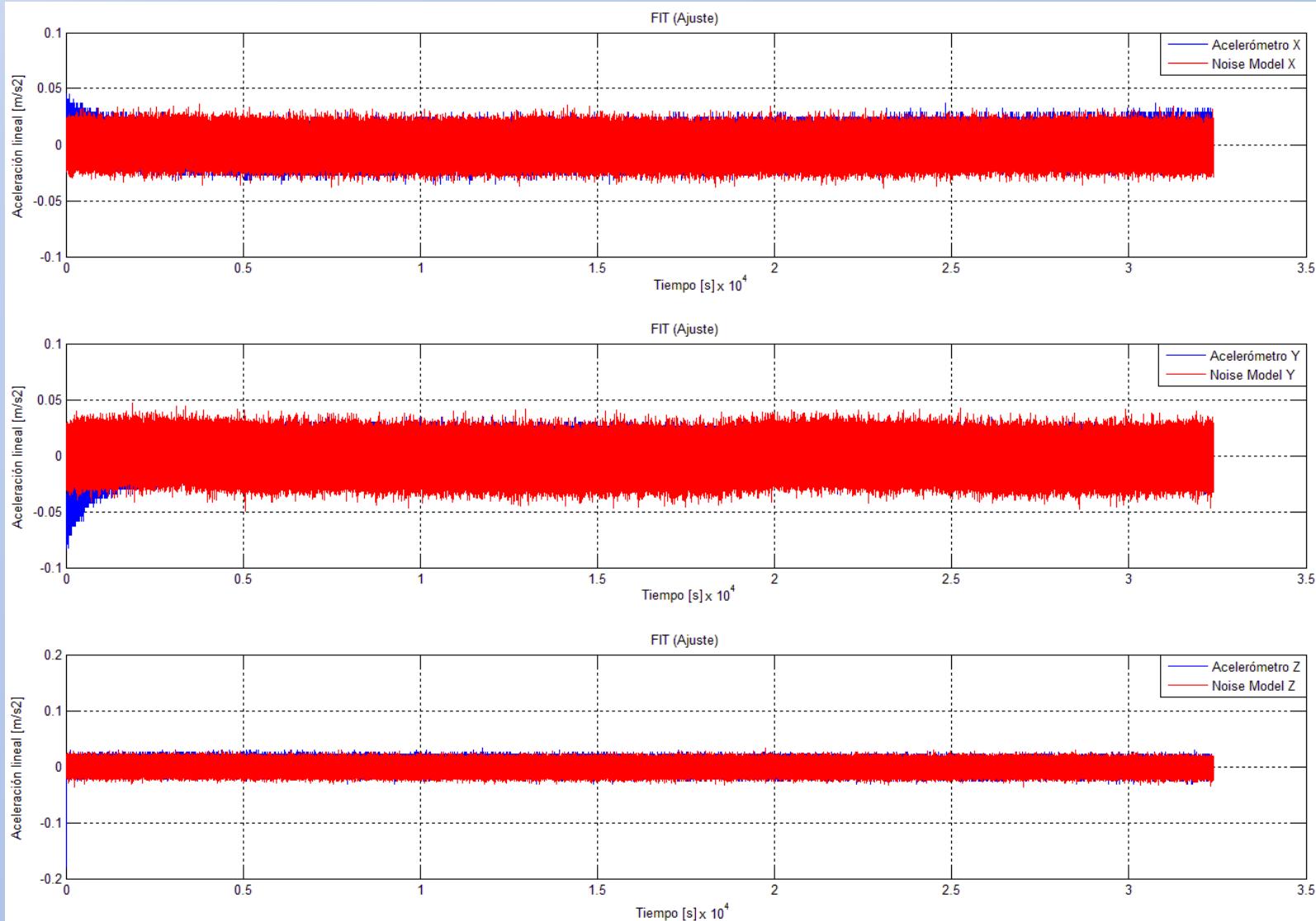
# GRAFICAS



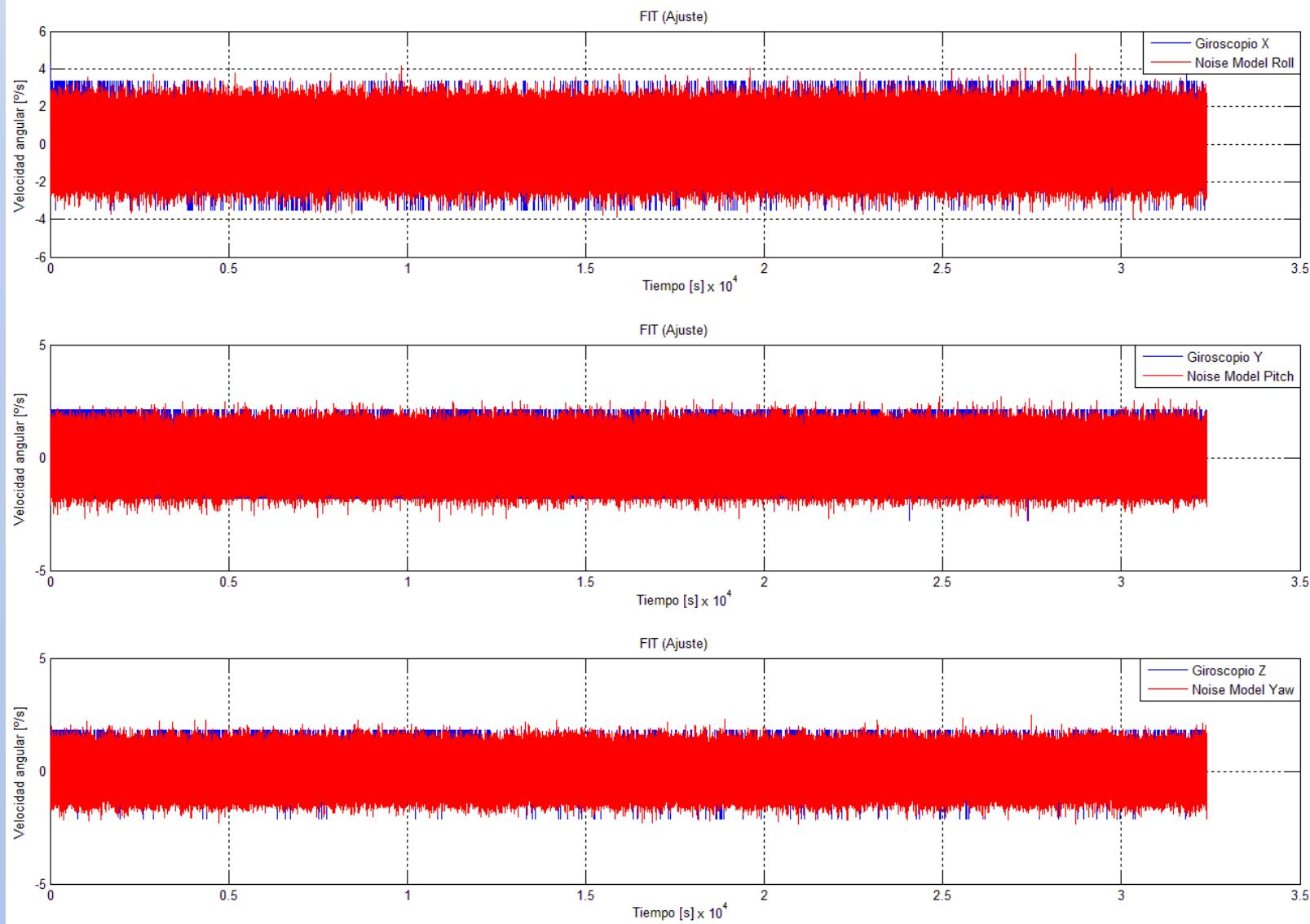
# GRAFICAS



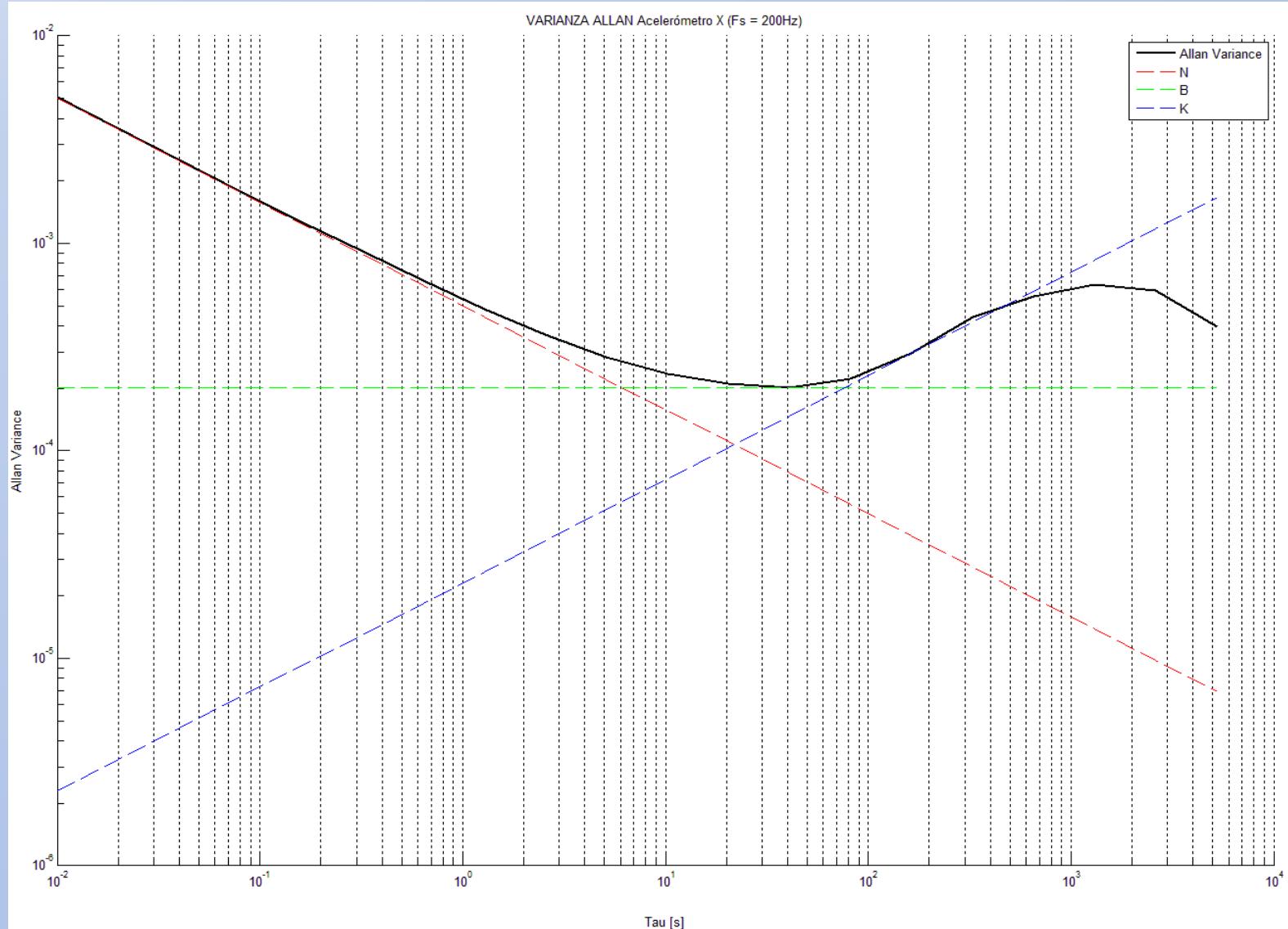
# GRAFICAS



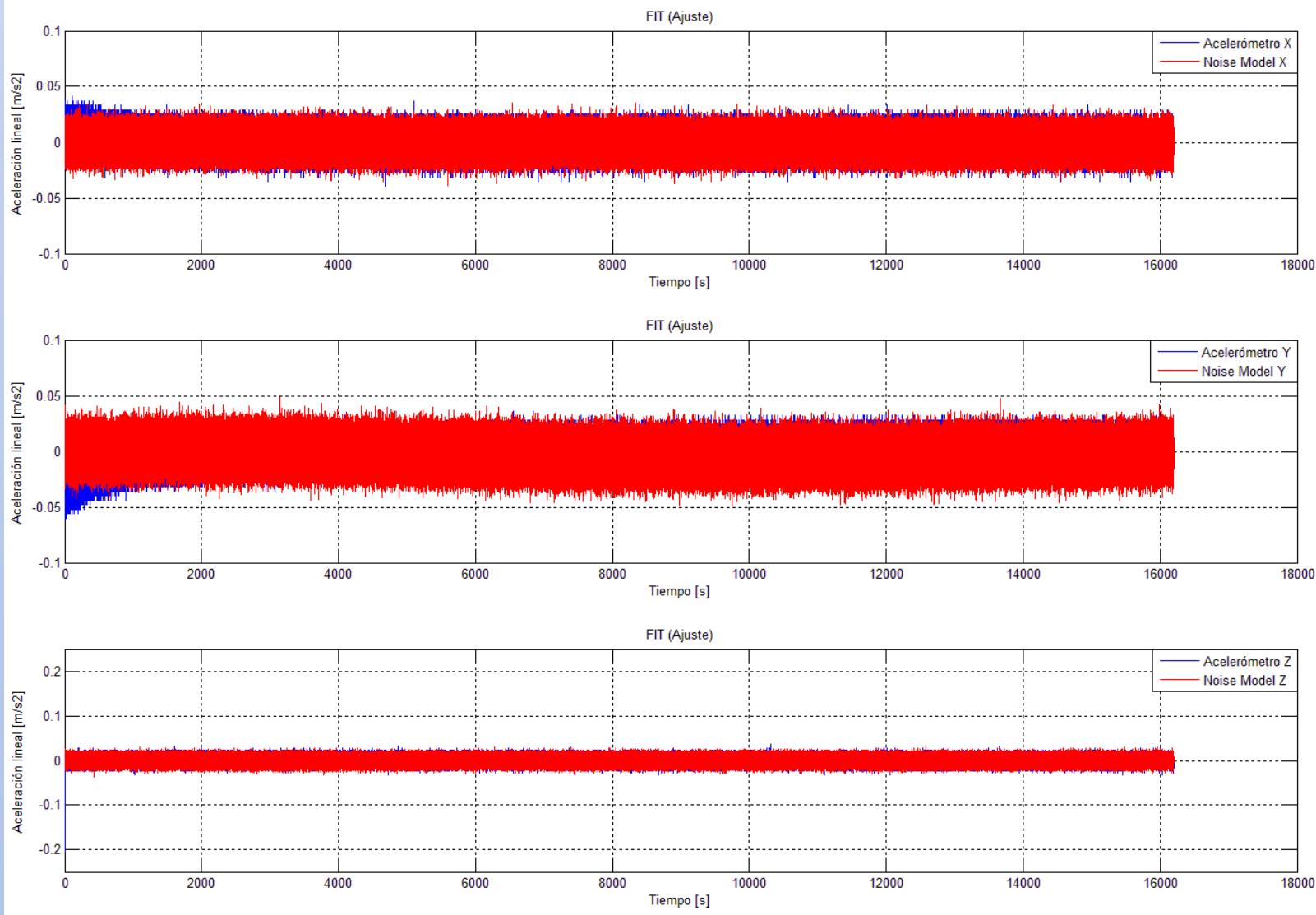
# GRAFICAS



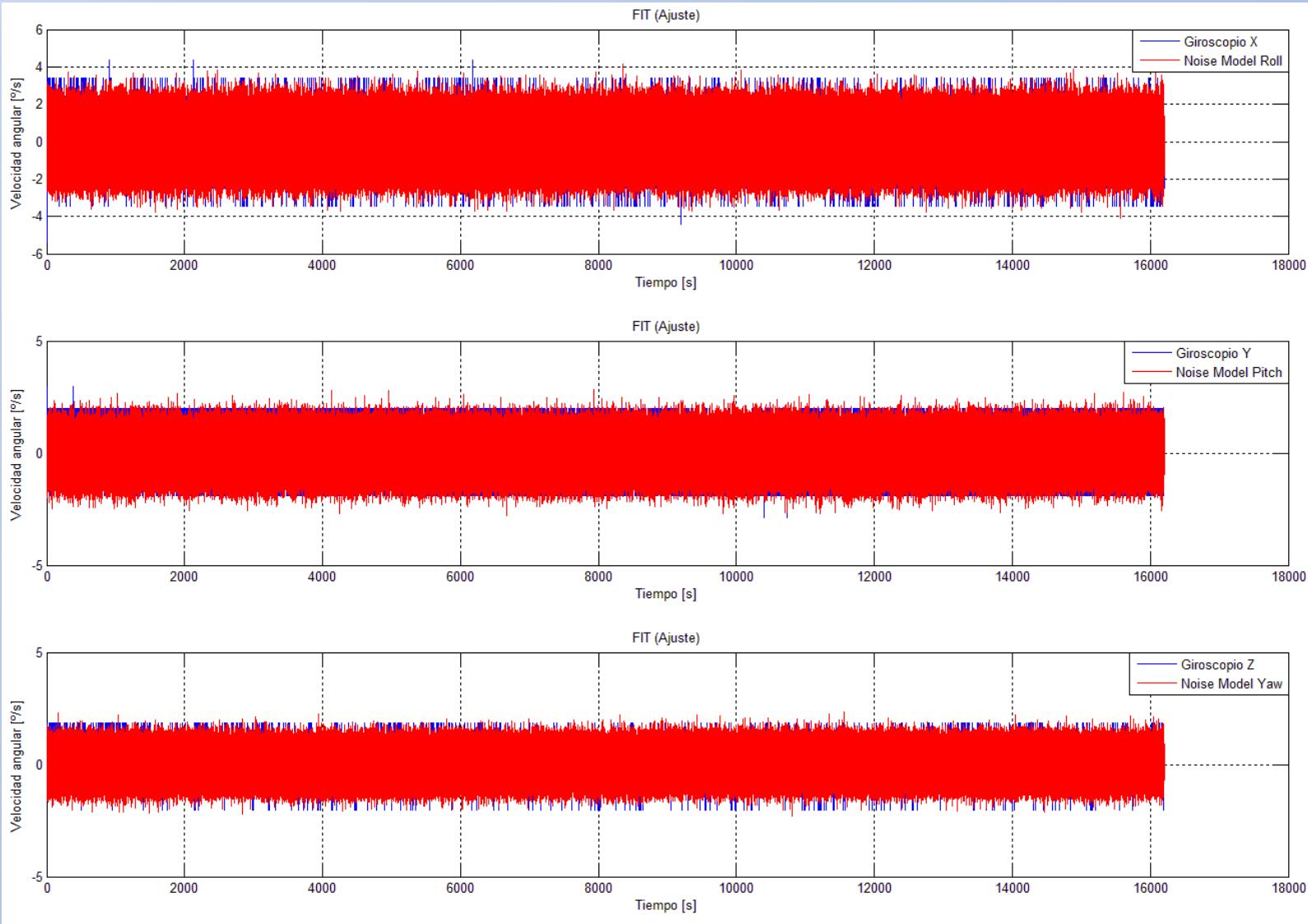
# GRAFICAS



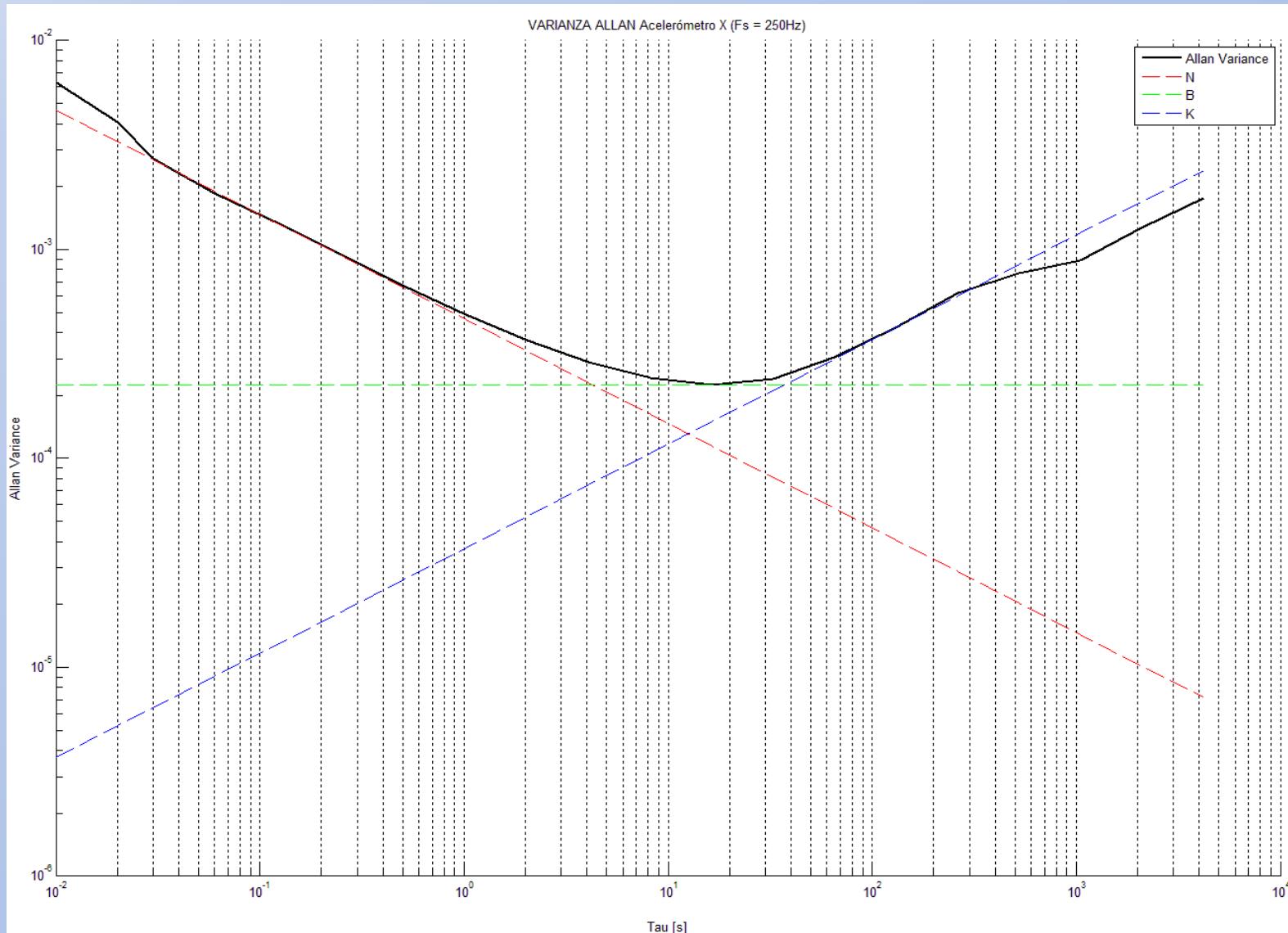
# GRAFICAS



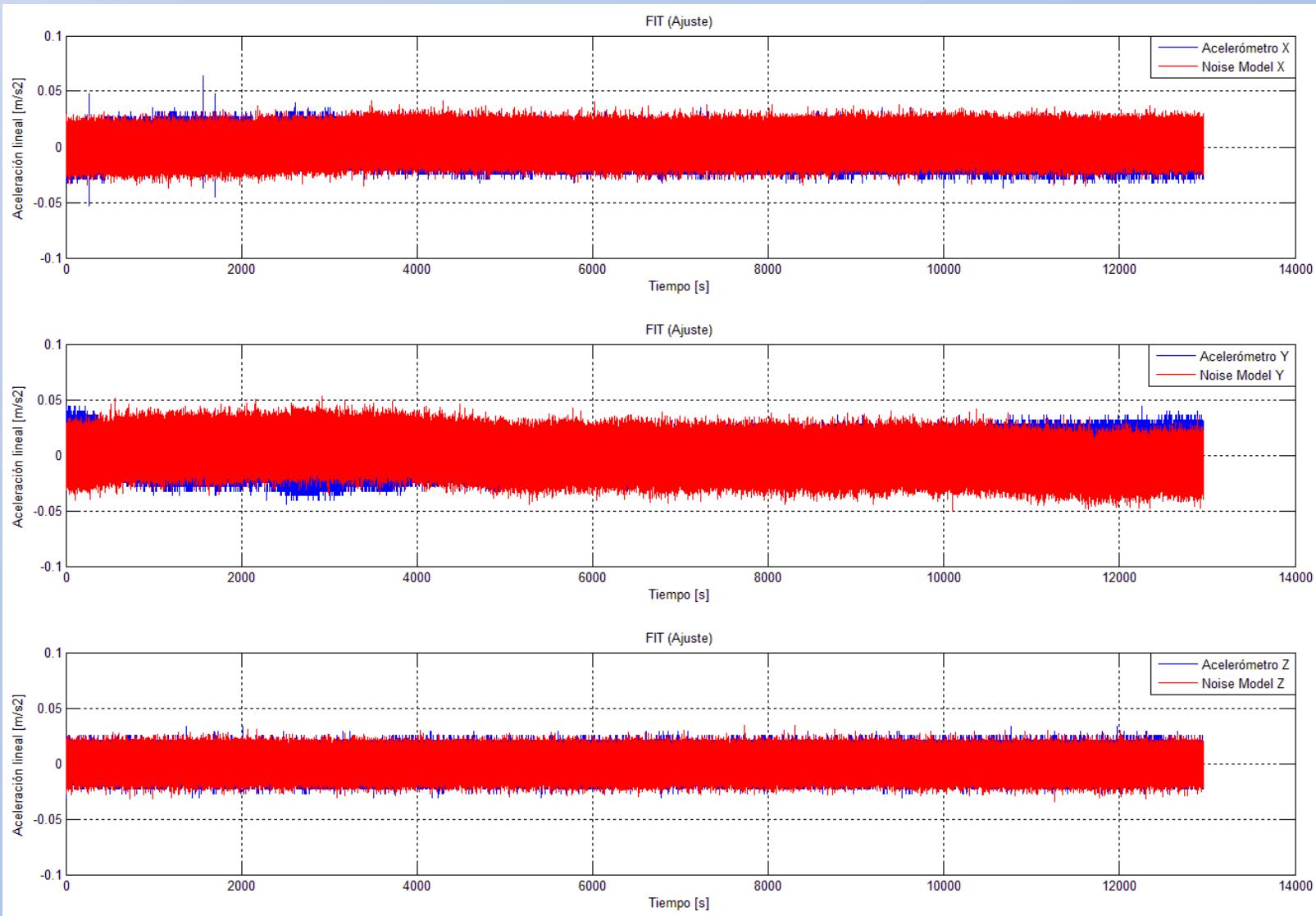
# GRAFICAS



# GRAFICAS



# GRAFICAS



# GRAFICAS

